

# **Bachelorarbeit**

Entwurf einer Energietankstelle  
Betrachtung einer Fernstreckentankstelle

von

Matthias Krügel

eingereicht am 30.04.2010 beim  
Institut für Angewandte Informatik  
und Formale Beschreibungsverfahren (AIFB)  
des Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Referent: Prof. Dr. Hartmut Schmeck  
Betreuer: Dipl.-Inform. Daniel Pathmaperuma

Heimatanschrift:  
Memelstr. 7  
91083 Baiersdorf  
m.kruegel@online.de

Studienanschrift:  
Turnerstr. 12  
76189 Karlsruhe

Ich versichere wahrheitsgemäß, die Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben, die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht zu haben und die Satzung der Universität Karlsruhe (TH) zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis beachtet zu haben.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
1.1	Motivation.....	7
1.2	Ausgangssituation.....	7
1.3	Zielsetzung.....	8
1.4	Abgrenzung.....	8
1.5	Aufbau der Arbeit.....	9
2	Grundlagen.....	10
2.1	Elektro- und Energietechnische Grundlagen.....	10
2.1.1	Stromstärke, Spannung, Leistung und Energie.....	10
2.1.2	Stromnetze.....	12
2.2	Elektroauto.....	13
2.2.1	Kurzer historischer Rückblick.....	13
2.2.2	Unterschied zum Hybridbetrieb.....	14
2.2.3	Unterschied zum Solarmobil.....	17
2.3	Aktueller Stand.....	17
2.3.1	Hersteller.....	18
2.3.2	Steckernorm.....	19
2.4	Bisherige Stromtankstellen.....	21
2.4.1	Technische Standards.....	21
2.4.2	Praktische Beispiele.....	21
2.4.3	Netz.....	22
3	Fernstreckentankstellen.....	23
3.1	Anforderungen.....	23
3.1.1	Reichweite.....	23
3.1.2	Tankzeit.....	26
3.1.3	Sicherheit und Komfort.....	26
3.2	Technische Forderungen an den Ladevorgang.....	27
3.2.1	Herleitung der betrachteten Szenarien.....	27
3.2.2	Anforderung an die Ladung in Szenario 1.....	29
3.2.3	Anforderung an die Ladung in Szenario 2.....	30
3.2.4	Anforderung an die Ladung in Szenario 3.....	31
3.2.5	Anforderung bezüglich Sicherheit und Komfort.....	32

3.3 Vergleich mit dem aktuellen Stand der Technik.....	33
3.3.1 Steckernorm – MENNEKES.....	33
3.3.2 Ladestationen Level 1, 2, 3.....	35
3.3.3 Vergleich der ermittelten Werte mit der Steckernorm und den Ladestationen .....	36
3.3.4 Fazit - Realisierbarkeit.....	37
3.4 Probleme.....	39
3.4.1 Kabel und Stecker - Handhabung.....	39
3.4.2 Netzanschluss – Spannung und Leistung des Anschlusses.....	40
3.4.3 Batterieprobleme.....	41
3.5 Lösungen.....	42
3.5.1 Lösungsansätze zu den Problemen von Seite der Tankstelle.....	42
3.5.2 Lösungsansätze zu den Problemen von Seite der Batterie.....	43
3.5.3 Realisierbarkeit und Grenzen.....	44
4 Alternativen.....	46
4.1 Akkutausch.....	46
4.2 Flüssigkeitswechsel.....	48
4.3 Brennstoffzelle.....	50
4.4 Trennung in Stadt- und Langstreckenfahrzeug.....	53
5 Resumé.....	55
5.1 Zusammenfassung.....	55
5.2 Bewertung der Ergebnisse.....	56
5.3 Ausblick.....	57

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Paralleler Hybrid	S. 14
	Quelle: [NAUN07; S. 68, Bild 6.5]	
Abbildung 2:	Serieller Hybrid	S. 15
	Quelle: [NAUN07; S. 68, Bild 6.5]	
Abbildung 3:	kombinierter und leistungsverzweigter Hybrid	S. 16
	Quelle: [NAUN07; S. 69, Bild 6.6]	
Abbildung 4:	Partnerschaften bei der Entwicklung von Ladetechnik	S. 20
	Quelle: [BERG09; S. 48]	
Abbildung 5:	MENNEKES-Stecker und Anschluss	S. 20
	Quelle: [BRUN10; S. 13, Abb. 4]	
Abbildung 6:	Ladekasten Park & Charge	S. 22
	Quelle: [PARK09]	
Abbildung 7:	Park & Charge - Netz in Deutschland	S. 22
	Quelle: [PARK09]	
Abbildung 8:	Diagramm Reichweite – Ladezeit	S. 30
	Quelle: Selbst erstellt	
Abbildung 9:	MENNEKES-Stecker in der Draufsicht	S. 33
	Quelle: [BRUN10; S. 14, Abb. 6]	
Abbildung 10:	Normenkonformität	S. 35
	Quelle: [BRUN10; S. 15, Tab. 3]	
Abbildung 11:	Level 3 Schnellladestation	S. 36
	Quelle: [COUL10a]	
Abbildung 12:	APD 1-POL Fingerschutz-Stecker	S. 37
	Quelle: [AUER10]	
Abbildung 13:	LUIS 4U green	S. 44
	Quelle: [LUIS10]	
Abbildung 14:	Prinzip der Redox-Flow-Zelle	S. 48
	Quelle: [CELL09; S. 1, Bild 1]	
Abbildung 15:	Brennstoffzelle	S. 51
	Quelle: [UNIM10]	

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Die 10 meistverkauften PKW-Modelle 2009 mit Reichweite	S. 25
Tabelle 2: Auswahl historischer Elektroautos mit Verbrauch und Reichweite	S. 28

## **Formelverzeichnis**

Formel 1: elektrische Leistung	S. 10
Formel 2: elektrische Energie	S. 11
Formel 3: Verbrauch – Strecke – Beziehung	S. 11
Formel 4: Ladeleistung	S. 11

## **1 Einleitung**

Im ersten Kapitel wird kurz beschrieben, unter welcher Motivation die Arbeit entstanden ist, welche Ausgangssituation vorliegt, welche Zielsetzung diese Arbeit verfolgt, wie der Inhalt abgegrenzt ist und welcher Aufbau der Arbeit zugrunde liegt.

### ***1.1 Motivation***

Die Elektromobilität ist ein bedeutendes Forschungsfeld unserer Zeit. Sie soll helfen, die Umweltschädigung zu reduzieren, indem Emissionen weitgehend aus dem Individualverkehr verschwinden, ohne die Mobilität des Einzelnen einzuschränken. In diesem Feld beschäftigt sich die Arbeit „Entwurf einer Energietankstelle – Betrachtung einer Fernstreckentankstelle“ mit der Untersuchung der Umsetzbarkeit einer Fernstreckentankstelle.

Dieser Bereich wurde bisher auf Grund verschiedener technischer Probleme selten betrachtet, daher besteht die Herausforderung dieser Arbeit aus der Untersuchung eines recht unerforschten, aktuellen Themas, das in den nächsten Jahrzehnten eine wichtige Rolle bei der Umsetzung der Umstellung auf die Elektromobilität spielen wird.

### ***1.2 Ausgangssituation***

Auf dem aktuellen Stand der Technik lassen sich mit Elektroautos relativ geringe Reichweiten erzielen, was eine erhebliche Einschränkung der Mobilität darstellt. Diese Einschränkung wird von einem Großteil der potentiellen Nutzer nicht akzeptiert, was die Verbreitung der Elektromobilität hemmt.

Neben der geringen Reichweite liegt ein zweites Argument gegen die Verbreitung bei der langen Ladezeit, die heutige Elektromobile erfordern. Mit Dauern von mehreren Stunden bis zu einem halben Tag, ist die Nutzung in einigen Bereichen zu wenig spontan und individuell möglich.

### ***1.3 Zielsetzung***

Das Ziel der Arbeit ist, die Gründe für die Nachteile der elektrisch betriebenen PKW zu ermitteln und zu untersuchen, um praktikable Lösungen zu finden, die zu einer Umsetzung einer Fernstreckentankstelle für Elektroautos führen können. Diese Lösungsansätze sollen auf Realisierbarkeit geprüft werden und für nicht lösbare Probleme sollen alternative Ansätze gefunden werden, die auf dem aktuellen Stand der Technik einsatzbereit sind oder realistisch in den nächsten Jahren einsetzbar werden.

### ***1.4 Abgrenzung***

Inhalt dieser Arbeit ist die Entwicklung von Konzepten für Fernstreckentankstellen im Sinne der jetzigen Autobahntankstellen. Daher wird die Betrachtung auf diese Arte von Ladestationen eingeschränkt und Stationen mit beispielsweise einer kontinuierlichen langsamen Ladung über Nacht, ausgeschlossen.

Sie Betrachtung fokussiert den persönlichen Individualverkehr. Daher betrachtet diese Arbeit nur PKW, und keine LKW oder andere Transportmittel für den Massenverkehr oder Gütertransport.

Die Betrachtung wird auf Deutschland beschränkt. Teilweise wird der deutschsprachige Raum herangezogen, dies wird allerdings gesondert erwähnt. Ergebnisse der Arbeit lassen sich teilweise auch auf benachbarte europäische Länder übertragen, wenn diese über eine ähnliche Infrastruktur und Bevölkerungsdichte verfügen.

Die Tankstellen selber werden auf einer Mikroebene betrachtet. Es wird nicht näher auf vorgelagerte Elemente, wie Trafo-Stationen oder Umspannwerke eingegangen.



## ***1.5 Aufbau der Arbeit***

Zu Beginn der Arbeit werden im Kapitel „Grundlagen“ einige für den weiteren Verlauf der Arbeit relevanten technische und historische Grundlagen erläutert und der aktuelle Stand der Technik wiedergegeben. Das Kapitel „Fernstreckentankstellen“ beschäftigt sich mit dem Kern der Arbeit. Hier werden zu Beginn die Anforderungen an eine Fernstreckentankstelle für Elektro-PKW hergeleitet. Im Anschluss werden die daraus resultierenden konkreten technischen Forderungen erarbeitet und mit dem aktuellen Stand der Technik verglichen. Aus der Differenz der technischen Forderungen zum aktuellen Stand der Technik resultieren Probleme, die im Detail vorgestellt werden, um dafür Lösungen zu entwickeln.

Im darauf folgenden Kapitel werden Alternativen für die nicht-lösbaren Probleme vorgestellt und bezüglich der Realisierbarkeit und Umsetzbarkeit untersucht.

Die Arbeit schließt mit einer komprimierten Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Fazit mit Ausblick auf die zukünftige Entwicklung.

## **2 Grundlagen**

Im Kapitel Grundlagen sollen in zusammenfassender Darstellung einige Grundlagen vermittelt und einige Entwicklungen aufgezeigt werden, die für die weitere Arbeit relevant sind. Begonnen wird mit einigen elektro- und energietechnischen Grundlagen, im Anschluss werden historische und technische Grundlagen zum Thema Elektroauto vorgestellt. Im dritten Teil wird auf den aktuellen Stand der Technik in relevanten Bereichen eingegangen, der vierte Teil beschäftigt sich mit Stromtankstellen in der bisherigen Form.

### ***2.1 Elektro- und Energietechnische Grundlagen***

Inhalt dieses Kapitels ist eine kurze Einleitung in die rechnerischen und technische Grundlagen, die für die weitere Arbeit vorausgesetzt werden.

#### **2.1.1 Stromstärke, Spannung, Leistung und Energie**

Die Arbeit befasst sich im Kern mit Ladeleistungen, Stromstärken und Spannungen von Ladestationen. Die wichtigste Größe bei der Dimensionierung von Ladevorgängen ist die Leistung.

Per Definition ist die elektrische Leistung  $P$  in [W] die „innerhalb einer Zeitspanne übertragene oder umgewandelte Energie.“ [BÜTT06; S. 35].

Diese kann rechnerisch aus der Spannung  $U$  in [V] und der Stromstärke  $I$  in [A] über folgende Formel ermittelt werden:

$$P = U \times I$$

**Formel 1: elektrische Leistung**

Die Größen, die die benötigte Leistung beim Ladevorgang festlegen, sind die Energie und die Zeit.

Die elektrische Energie  $W$  hier in [Wh] drückt das „Arbeitsvermögen der elektrischen Spannung aus“ [BÜTT06; S. 34] und wird nach der Formel

$$W = U \times I \times t \quad \text{oder} \quad W = P \times t$$

**Formel 2: elektrische Energie**

berechnet, wobei  $t$  die Zeit ausdrückt und in den folgenden Rechnungen meistens in Stunden [h] angegeben wird. Die elektrische Energie, die der Akku beim Elektroauto speichern kann wird auch als Kapazität der Batterie bezeichnet und gibt über den Verbrauch in [kWh / 100 km] rechnerisch die Reichweite des PKW an.

Ein PKW mit einer Kapazität von 33 kWh und einem Verbrauch von 11 kWh / 100km kann nach der Rechnung

$$\text{Verbrauch} = W / s \quad \text{oder} \quad s = W / \text{Verbrauch}$$

**Formel 3: Verbrauch – Strecke – Beziehung**

mit der Strecke  $s$  in [km], eine Strecke von 300 km zurücklegen.

Die Leistung muss so dimensioniert werden, dass die Kapazität des Akkus in einer vorgegebenen Zeit wieder aufgeladen wird. Diese wird über die Formel

$$t = W / P \quad \text{oder} \quad P = W / t$$

**Formel 4: Ladeleistung**

ermittelt.

Aus einer Kapazität von beispielsweise 33kWh, die in 10 Minuten, also 1/6 h geladen werden soll, resultiert eine benötigte Leistung von 198 kW, die bei gegebener Spannung von beispielsweise 400V nach der umgestellten Formel 1 eine Stromstärke von 495 A erfordert.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Nach [BÜTT06]

## 2.1.2 Stromnetze

In diesem Kapitel wird auf die Höchst- und Hochspannungsnetze nur kurz eingegangen, da diese im Anschluss einer Tankstelle keine direkte Rolle spielen.

Die Stromnetze können nach ihren Spannungen in vier Arten eingeteilt werden.

### 1. Die Höchstspannungsnetze

Die Höchstspannungsnetze dienen vorwiegend dem Transport des elektrischen Stromes über weite Distanzen. Dabei werden üblicherweise Spannungen von 220 kV und 380 kV verwendet.<sup>2</sup>

### 2. Die Hochspannungsnetze

Die 110 kV Hochspannungsnetze dienen der regionalen Verteilung des elektrischen Stroms aus den Höchstspannungs-Transportnetzen auf Verbraucherschwerpunkte.<sup>3</sup>

### 3. Mittelspannungsnetze

„Mittelspannungsnetze beziehen ihre Energie aus einem vorgelagerten 110 kV-Netz.“ [SCHW06; S. 481] Die Verteilung erfolgt an die Ortsnetzstationen und einige industrielle Großabnehmer. In Deutschland wurde die Spannung auf 10 kV in Ortsnetzen und 20 kV in ländlichen Gegenden festgelegt. Die Spannung wird am Ort des Abnehmers mit einer Transformatorstation auf die benötigte Ausgangsspannung heruntertransformiert.

### 4. Niederspannungsnetze

Die Niederspannungsnetze, die den Strom in den Haushalten zur Verfügung stellen, übertragen mit Spannungen von 230 V oder 400 V. Daneben kommen in Industrie-Niederspannungsnetzen auch Spannungen von 500 V oder 700 V zum Einsatz.<sup>4</sup>

---

<sup>2</sup> Nach [SCHW06; S. 400]

<sup>3</sup> Nach [SCHW06; S. 478]

<sup>4</sup> Nach [SCHW06]

## **2.2 Elektroauto**

Das Elektroauto als solches ist schon älter, als das Benzinbetriebene. Die ersten Vorfahren der modernen Elektrofahrzeuge waren nicht von einem Akku gespeist, sondern aus einer Oberleitung. Auf Grund der langen Historie strombetriebener Fortbewegungsmittel soll im ersten Teil kurz auf die geschichtliche Entwicklung eingegangen werden. Im zweiten und dritten Teil folgt dann zur weiteren Abgrenzung eine kurze Erläuterung von Hybrid- und Solarfahrzeugen und die Unterscheidungsmerkmale zum reinen Elektroauto.

### **2.2.1 Kurzer historischer Rückblick**

Das erste als solches zu bezeichnende Elektroauto fuhr bereits 1882 in Berlin. Dieses wurde allerdings nicht mit einer Batterie betrieben, sondern, wie zuvor erwähnt, aus einer Oberleitung gespeist, es ist demnach eher ein Vorgänger der heutigen Oberleitungsbusse.

Nur sechs Jahre später wird in London das erste von einer Batterie betriebene Auto vorgestellt. Noch vor 1900 etablierte sich das Elektrofahrzeug, so wurden beispielsweise von Feuerwehren vermehrt Elektroautos eingesetzt. Ein Vorteil von Elektroautos bestand darin, dass das mühsame Ankurbeln entfiel, dieser Vorteil wurde aber bald durch den elektrischen Anlasser neutralisiert, sodass ab den 1920er Jahren langsam der Verbrennungsmotor an Bedeutung gewann.

Erst in den 1990er Jahren wurde von den Regierungen das elektrische Fahrzeug stärker gefördert, sodass einige Serien von Elektromobilen von verschiedenen Automobilherstellern entwickelt und in kleinen Auflagen verkauft oder verleast wurden. Naunin spricht von einer Zahl von insgesamt etwa 5000 Fahrzeugen in den letzten Jahren.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Nach [NAUN07; S. 1 ff.]

## 2.2.2 Unterschied zum Hybridbetrieb

Im Gegensatz zum reinen Elektrofahrzeug nimmt der Verkauf von Hybridautos seit Toyota 1997 den Prius als Hybrid-Serienfahrzeug einführt, rasch zu.

Unter einem Hybridantrieb versteht man „Fahrzeugantriebe (...), die über mindestens zwei verschiedenartige Energiewandler und -speichersysteme verfügen. Am bekanntesten ist die Kombination von Verbrennungsmotor/Kraftstofftank und Elektroantrieb/-speicher, der sogenannte Elektrohybrid.“[NAUN07; S. 67]

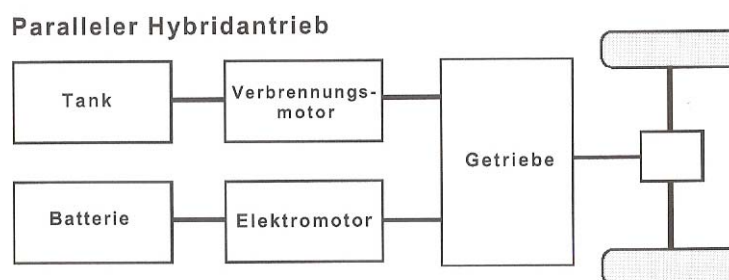
Hybridfahrzeuge können neben einer wirkungsgradbegünstigenden Betriebsweise des Verbrennungsmotors, einem abgasfreien und geräuschreduzierten Fahrbetrieb in sensiblen Ballungsgebieten, vor Allem einen reduzierten Energieverbrauch durch Nutzbremmung bieten.<sup>6</sup>

Grundsätzlich kann man Hybridantriebe in drei Kategorien unterteilen:

### ➤ Paralleler Hybridantrieb

„Beim parallelen Hybrid sind Verbrennungsmotor und Elektromaschine mechanisch mit der Antriebsachse verbunden. Beide können einzeln oder gemeinsam betrieben werden (...).“[NAUN07; S. 68]

Durch die Leistungsaddition können die einzelnen Motoren kleiner dimensioniert und bei begrenztem Leistungsbedarf auf den emissionsfreien Elektromotor umgeschaltet werden.<sup>7</sup> Das Prinzip ist der Abbildung 1 zu entnehmen.



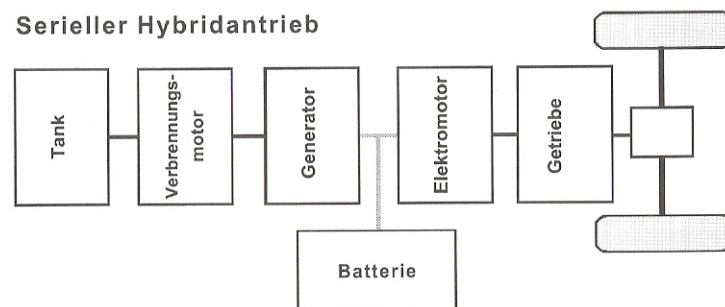
**Abbildung 1: Paralleler Hybrid**

<sup>6</sup> Nach [NAUN07; S. 67]

<sup>7</sup> Nach [NAUN07; S. 68]

## ➤ Serieller Hybridantrieb

Das Funktionsprinzip des seriellen Hybridantriebs ist in Abbildung 2 zu sehen. Im Gegensatz zum parallelen Hybrid wird das Fahrzeug ausschließlich durch den Elektromotor betrieben. Der Verbrennungsmotor dient einzig der Stromerzeugung, sodass statt eines reinen Akkubetriebs bei dieser Technik Kraftstoff zur Energieerzeugung verwendet wird. Der Nachteil dieses Prinzips sind die mehrfache Energiewandlung, durch die wirkungsgradbedingt Verluste entstehen, und die Dimensionierung der Motoren, denn da diese nicht mehr gleichzeitig genutzt werden können, müssen sie die gleiche Höchstleistung erreichen, die gleichzeitig die Höchstleistung des Fahrzeugs darstellt.<sup>8</sup>



**Abbildung 2: Serieller Hybrid**

---

<sup>8</sup> Nach [NAUN07; S. 68]

➤ Split-hybridantrieb

Der Split-Hybrid stellt die Kombination der zuvor vorgestellten Antriebsformen dar. Dabei kann nach kombiniertem Hybridantrieb und leistungsverzweigendem Hybridantrieb unterschieden werden. Bei beiden kann durch eine Kupplung zwischen dem parallelen und seriellen Betrieb umgeschaltet werden. Beim Leistungsverzweigten besteht die Möglichkeit beides zur optimalen Leistungsausbeute zu kombinieren.<sup>9</sup> Zur besseren Anschauung werden beide Varianten nochmal als Grafik dargestellt.

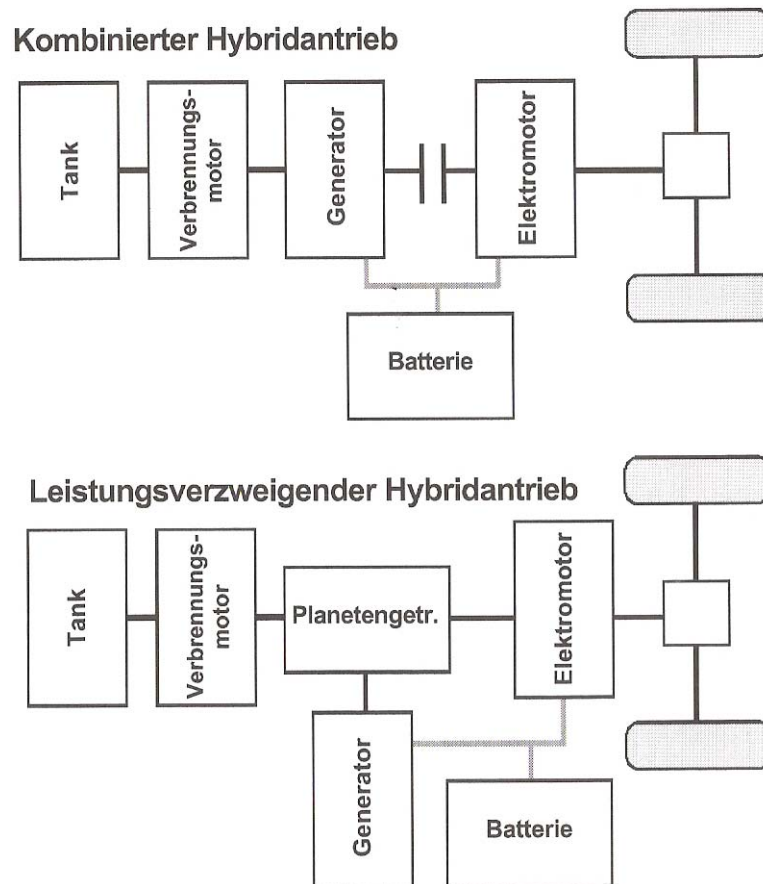


Abbildung 3: kombinierter und leistungsverzweigter Hybrid

<sup>9</sup> Nach [NAUN07; S. 69]



### **2.2.3 Unterschied zum Solarmobil**

Ein weiteres Konzept der Nutzung von elektrischer Antriebstechnik ist der Betrieb von Solarfahrzeugen. Dabei wird ein Elektromotor eingesetzt, der entweder durch eine Batterie versorgt wird, die von Solarzellen auf dem Fahrzeug gespeist ist, oder direkt von den Solarzellen Strom erhält. Das erste Solarfahrzeug entwickelte Alan Freeman Ende der 1970er Jahre in England. Das Interesse begann erst 1985 zu wachsen, als in der Schweiz die „Tour de Sol“ als erstes größeres Solarmobilrennen stattfand.

Der Begriff „Solarmobil“ wird heute nicht mehr nur für Fahrzeuge mit Solarzellen auf dem Dach genutzt, sondern auch für elektrische Fahrzeuge, die ihre Energie ausschließlich aus regenerativen Quellen, vorzugsweise Solarenergie, beziehen. Relevant ist dabei, „(...) dass zumindest im Jahresmittel mehr Strom erzeugt wird, als mit dem Fahrzeug verbraucht wird.“ [REIC04; S. 4, Z.5 f.] Der gesamte Netzverbund, von der Stromerzeugung via Solarenergie, bis zur Übertragung zählt daher im weiteren Sinne zum Solarmobil.

Man kann sagen, dass grundsätzlich jedes Elektroauto nach dieser Definition zum „Solarmobil“ werden kann, wenn der Strom aus Sonnenenergie stammt.<sup>10</sup>

## **2.3 Aktueller Stand**

Zum weiteren Einstieg in das Thema Elektromobilität wird im folgenden Abschnitt ein Überblick über den Aktuellen Stand der Technik gegeben, bevor im Kapitel drei detailliert auf das Thema Elektromobilität und die entsprechende Tankstellentechnik eingegangen wird. Zuerst soll ein Überblick über die Hersteller von aktuellen Elektroautos gegeben werden, wobei hierbei nicht auf Hybridautos eingegangen wird. Im Anschluss wird die aktuelle Steckernorm und zuletzt bisherige Stromtankstellen betrachtet.

---

<sup>10</sup> Nach [REIC04]

### 2.3.1 Hersteller

Die Liste der Hersteller, die in den nächsten Jahren die Einführung reiner Elektroautos planen, ist lang. Beinahe jeder bedeutende Hersteller von Großserienfahrzeugen hat schon bekannt gegeben, welche Modelle er wann plant und wenn die Ankündigungen eintreffen, wird in spätestens zwei bis fünf Jahren eine breite Palette rein elektrisch betriebener PKW vorhanden sein.<sup>11</sup>

Diese Vorhaben alle aufzuzählen, wäre hier zu umfangreich, daher soll in diesem Kapitel gezielt auf PKW eingegangen werden, die bereits am Markt verfügbar sind oder waren. In diesem Bereich existiert eine Menge, da viele Hersteller in Kleinserien elektrische Stadtautos gebaut haben. Daher werden hier nur einige besonders interessante Modelle vorgestellt.

Ein besonders interessantes Modell von einem Hersteller, den man nicht selbstverständlich mit umweltfreundlichen Elektroautos in Verbindung bringen würde, ist der EV-1 von General Motors aus den USA. Bei diesem PKW handelt es sich um einen Sportwagen, der bereits 1990 in Los Angeles vorgestellt wurde und rein elektrisch betrieben wird. Die Leistung des EV-1 war auf einem für die Zeit beachtlichen Stand. Mit einer Beschleunigung von 0 auf 100 km/h in 8,5 Sekunden und einer Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h erreichte dieser Sportwagen in der verbesserten Version eine Reichweite von etwa 160km mit einer Batterieladung. Der EV-1 wurde als Testserie mit knapp über 1000 Fahrzeugen an ausgewählte Fahrer ab 1996 verleast. Zu den Nachteilen gehörten allerdings die Ladezeit von drei bis sechs Stunden und die beengten Raumverhältnisse.

Im Jahr 2002 wurden sämtliche Fahrzeuge von General Motors zurückgerufen und – trotz Protesten vieler Besitzer – verschrottet.<sup>12</sup>

Ein weiteres besonders interessantes Modell ist der Maya 100, ein Gemeinschaftsprojekt der kanadischen Firma Electrovaya und der norwegischen Firma Miljobil Grenland AS. Bei diesem PKW handelt es sich um einen SUV, der rein elektrisch betrieben wird. Nach der Teilnahme an der „Tour de Sol“ im Jahr 2004 gewann der Maya 100 einige Awards für die beste Technologie und Batterietechnik. Mit einer Reichweite von etwa 360km überwindet dieses Modell eine akzeptable Distanz, erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h und eine Ladezeit von 6 bis 8 Stunden bei

---

<sup>11</sup> Nach [ELEK10]

<sup>12</sup> Nach [FOCU10]

220V Netzspannung und etwa 6 kW Ladeleistung.<sup>13</sup> Dieser PKW steht in Nordamerika für etwa 70.000 \$ zum Verkauf.<sup>14</sup>

Bekanntere Automobilhersteller, die seit Jahren Elektroautos verkaufen, sind die französischen Hersteller Renault und Citroen. Die Modelle Citroen SAXO und Berlingo und die Modelle Renault Twingo Quickshift Elettrica und Kangoo stehen oder standen als Elektroversionen zum Verkauf. Allerdings sind die Reichweiten bei allen Modellen auf etwa 100 km begrenzt und auch die Höchstgeschwindigkeiten liegen nicht bedeutend über 100 km/h. Damit eignen sich diese Modelle hauptsächlich als reine Stadtautos und sind in keiner großen Stückzahl verkauft worden.<sup>15</sup>

Auch Smart hat ein elektrisches Modell veröffentlicht, was allerdings nur in den USA und der Schweiz zu erwerben ist.<sup>16</sup>

### **2.3.2 Steckernorm**

Eine wichtige Komponente der Elektromobilität ist die Ladestation. Standards sind hier unerlässlich, um eine Verbreitung der Technologie zu erreichen. Dabei spielt die Schnittstelle zwischen Ladestation und PKW eine entscheidende Rolle.

Neben neuen Konzepten, wie der induktiven Ladung per Induktionsplatte, spielt momentan die klassische Verbindung per Stecker die wichtigste Rolle. Verschiedene Hersteller sind mit verschiedenen Partnern schon seit einer Weile mit der Entwicklung von Steckern und Ladestandards beschäftigt.

---

<sup>13</sup> 40 kWh in 6 h und 40 min

<sup>14</sup> Nach [GREE05]

<sup>15</sup> Nach [ELEK10] und [REIC05]

<sup>16</sup> Nach [ELEK10]

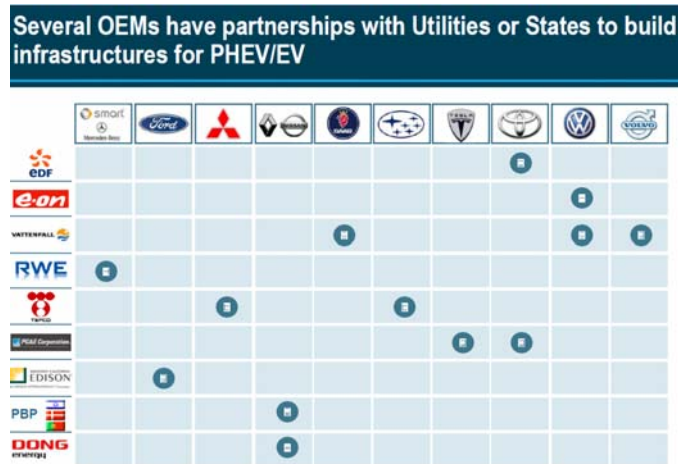


Abbildung 4: Partnerschaften bei der Entwicklung von Ladetechnik

Nun sind die größten europäischen Energieversorgungsunternehmen und Automobilhersteller Anfang 2009 zusammengekommen und haben sich auf die grundsätzlichen Eckpunkte für den Ladeanschluss von Elektroautos geeinigt.<sup>17</sup>

Der Steckerhersteller MENNEKES reichte dazu einen Normentwurf ein, der letztendlich angenommen wurde.

Die Ladung kann mit diesen Steckern sowohl einphasig mit 230 V, als auch dreiphasig mit 400 V erfolgen. Die maximale Stromstärke beträgt dabei 63 A. Zusätzlich enthält der Stecker zwei Kommunikationsanschlüsse, einen „proximity“-Kontakt, der beispielsweise für die Aktivierung der Wegfahrsperrung während des Ladevorgangs sorgt und einen „Control-pilot“-Kontakt, der zur Kommunikation, bzw. Datenübertragung sorgt.<sup>18</sup>



Abbildung 5: MENNEKES-Stecker und Anschluss

<sup>17</sup> Nach [WATT10]

<sup>18</sup> Nach [MENN09]

## **2.4 Bisherige Stromtankstellen**

Zum Vergleich mit der späteren Erarbeitung wird in diesem Abschnitt kurz auf die bisherigen Stromtankstellen eingegangen. Dabei wird die Technik beleuchtet, Anhand eines Beispiels verdeutlicht und deren Verbreitung bzw. Durchsetzung betrachtet.

### **2.4.1 Technische Standards**

In der Vergangenheit waren Ladestationen für Elektroautos nicht einheitlich ausgelegt. Dazu bestand auch keine Notwendigkeit, da für die meist recht kleinen Elektro-PKW mit geringer Leistung eine Steckdose mit den üblichen 230 V und 16 A ausreicht. Daneben gibt es Anbieter, wie Park & Charge, die eine halböffentliche Infrastruktur aufgebaut haben. Näheres zu Park & Charge in Kap. 2.4.2.

Die öffentlichen oder halböffentlichen Tankstellen können auch mit 400V Drehstrom<sup>19</sup> betrieben werden, sodass entweder mehrere Fahrzeuge gleichzeitig geladen werden können oder ein Fahrzeug eine kürzere Ladezeit benötigt.

### **2.4.2 Praktische Beispiele**

Für praktische Beispiele wird der Verein Park & Charge betrachtet.

1992 wurden in Bern die ersten vier Tankstellen gebaut. Seit dem wurde das Netz stark erweitert, so existieren 2003 in der Schweiz bereits 110 Tankstellen.<sup>20</sup>

Im Prinzip handelt es sich bei dem Park & Charge System über einen einfachen Stromkasten, der durch ein Schloss abgeriegelt ist. Die Benutzer erhalten gegen eine Jahresgebühr einen Schlüssel, der in alle Schlösser des Betreibers passt und können damit alle Stromtankstellen nutzen. Im Prinzip kann man von einer Flat-Rate für Elektrofahrzeuge sprechen. In der Abbildung 7 ist das aktuelle Netz in Deutschland dargestellt.<sup>21</sup>

---

19 Drehstrom: Andere Bezeichnung von Dreiphasenwechselstrom. Entsteht aus einer zweckmäßigen Verkettung von drei Einphasenwechselströmen [LISG06]

20 Nach [REIC03]

21 Nach [PARK09]



Abbildung 6: Ladekasten Park & Charge



Abbildung 7: Park & Charge - Netz in Deutschland

### 2.4.3 Netz

Insgesamt sind Anbieter, wie Park & Charge in Deutschland allerdings sehr selten. Einige Firmen haben noch Stromtankstellen für ihre Mitarbeiter eingerichtet, ein so flächendeckendes Netz, wie es beispielsweise bei den Benzintankstellen existiert, gibt es hier nicht, siehe Abbildung 7.

Dies ist bei der kleinen Anzahl von Elektroautos in Deutschland<sup>22</sup> und der Möglichkeit der Ladung an der heimischen Steckdose nicht verwunderlich.

<sup>22</sup> Insgesamt 1588 zugelassene Elektro-PKW in Deutschland zum 01.01.2010 nach [KBA 10b]

### **3 Fernstreckentankstellen**

In diesem Kapitel wird die Kernthematik der Arbeit, die Stromtankstelle für den Fernverkehr, wie etwa Autobahntankstellen, behandelt. Um dieses Thema umfassend zu behandeln, wird mit einem hohen Abstraktionsgrad begonnen, der dann zunehmend verfeinert und detailliert wird.

Zu Beginn werden die allgemeinen Anforderungen der Nutzer an einen PKW untersucht, die im Zusammenhang mit Tankstellen eine Rolle spielen. Aus diesen Anforderungen werden dann konkrete Forderungen an den Tankvorgang, in diesem Fall Ladevorgang, herausgearbeitet, die im nächsten Schritt technisch untersucht, mit dem aktuellen Stand der Technik verglichen und auf Realisierbarkeit geprüft werden. Danach werden Probleme analysiert, die einer Realisierung im Wege stehen und Lösungsansätze dazu erarbeitet.

#### ***3.1 Anforderungen***

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die Anforderungen an eine Stromtankstelle für Fernstrecken erarbeitet. Da diese oft nicht in Studien ermittelt oder verfügbar sind, werden Abschätzungen auf Basis bestehender Technologie und Durchschnittswerte genutzt. Die Herleitung wird umfassend erläutert, um eine Nachvollziehbarkeit und Prüfbarkeit zu gewährleisten.

##### **3.1.1 Reichweite**

Ein wichtiger Aspekt der Mobilität im Allgemeinen, aber besonders der Elektromobilität ist die Reichweite der PKW. Eines der Ziele im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung ist daher auch die Erhöhung der spezifischen Energiedichte, „Um langfristig eine Reichweite vergleichbar mit heutigen PKW zu erreichen (...)“ [BUND09; S. 10]

Um eine realistische Zielreichweite zu ermitteln, werden die zehn meistverkauften PKW des Jahres 2009 in Deutschland und deren Reichweiten nach Herstellerangaben betrachtet. Die Liste ist der Statistik des Kraftfahrtbundesamtes KBA entnommen<sup>23</sup>, die Reichweiten stammen von den Internetseiten der Hersteller.

Die meistverkauften PKW 2009 sind der VW Golf, VW Polo, Opel Corsa, Opel Astra, Skoda Fabia, Ford Fiesta, VW Passat, Mercedes C-Klasse, Audi A4 und der BMW 3er.

Da keine konkreten Modellvarianten angegeben sind, wird jeweils die Reichweite eines Modells einer mittleren Motorisierung mit einem Benzinmotor betrachtet. Der Grund dafür ist die Abschätzung der Kundenakzeptanz. Dieselmotoren erreichen unter Umständen eine deutlich höhere Reichweite, aus Preisgründen sind die Benzinmodelle trotzdem gefragt, daher werden diese zur Abschätzung einer breiten unteren Akzeptanzschwelle herangezogen. Bei den Mittelklasse PKW und beim Skoda Fabia werden die Kombimodelle betrachtet.

Alle Daten können der Tabelle 1 entnommen werden.

Der PKW mit der geringsten Reichweite ist der Ford Fiesta mit 636 km. Zur einfacheren Rechnung wird dieser Wert auf 600km abgerundet. Das ist der Wert, an dem sich diese Arbeit im Weiteren orientiert.

---

<sup>23</sup>Nach [AUTO10]



Modell	Genaue Bezeichnung und Daten
VW Golf	Golf 1.4 TSI 118 kW Tank 55 l Verbrauch kombiniert: 6,8 l / 100 km Reichweite rechnerisch: <sup>24</sup> 809 km
VW Polo	Polo 1.4 63 kW Tank 45 l Verbrauch kombiniert: 5,9 l / 100 km Reichweite rechnerisch: <sup>20</sup> 763 km
Opel Corsa	Corsa 1.4 Twinport 74 kW Tank 45 l Verbrauch kombiniert: 5,9 l / 100 km Reichweite rechnerisch: <sup>20</sup> 763 km
Opel Astra	Astra 1.6 ECOTEC 85 kW Tank 56 l Verbrauch kombiniert: 7,1 l / 100 km Reichweite rechnerisch: <sup>20</sup> 789 km
Skoda Fabia	Fabia Kombi 1.6 77 kW Tank 45 l Verbrauch kombiniert: 6,9 l / 100 km Reichweite rechnerisch: <sup>20</sup> 652 km
Ford Fiesta	Fiesta 1.4 Duratec Automatik 71 kW Tank 42 l Verbrauch kombiniert: 6,6 l / 100 km Reichweite rechnerisch: <sup>20</sup> 636 km
VW Passat	Passat 2.0 TSI 147 kW Tank 70 l Verbrauch kombiniert: 7,9 l / 100 km Reichweite rechnerisch: <sup>20</sup> 886 km
Mercedes C-Klasse	C 200 CGI BlueEfficiency T-Modell 135 kW Tank 59 l Verbrauch kombiniert: 8,0 l / 100 km Reichweite rechnerisch: <sup>20</sup> 738 km
Audi A4	A4 Avant 2.0 TFSI 155 kW Tank 65 l Verbrauch kombiniert: 7,3 l / 100 km Reichweite rechnerisch: <sup>20</sup> 890 km
BMW 3er	320i Touring 125 kW Tank 63 l Verbrauch kombiniert: 6,4 l / 100 km Reichweite rechnerisch: <sup>20</sup> 984 km

**Tabelle 1: Die 10 meistverkauften PKW-Modelle 2009 mit Reichweite**

24 Reichweite = Tankfüllung / Verbrauch

### **3.1.2 Tankzeit**

Ein wichtiger Punkt ist die Tank- bzw. Ladezeit. Auch der Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität<sup>25</sup> macht darauf aufmerksam, dass diese zu reduzieren ist.

Genaue Anforderung an die Tankzeit abzuschätzen ist sehr schwierig, da keine statistischen Daten vorliegen und auch nach ausgiebiger Recherche nicht ermittelt werden konnten. Eine Rechnung aus der Kapazität und stündlichen Auslastung von Tankstellen erweist sich als unbrauchbar, da sie zu theoretisch wäre.

Was relativ sicher gesagt werden kann, ist, dass eine halbe Stunde Ladezeit auf einer Langstreckenfahrt für einen Großteil der Autofahrer zu viel ist, wenn nicht ein neues Geschäftsmodell entsteht, dass andere Tätigkeiten mit dem Tankvorgang kombiniert. Darauf geht diese Arbeit jedoch nicht ein, hier soll die Umsetzung einer klassischen Fernstreckentankstelle für Elektromobilität untersucht werden.

Ein normaler Tankvorgang benötigt abhängig vom getankten Volumen bei Benzin, Diesel oder auch Gas etwa drei bis fünf Minuten.<sup>26</sup>

Während des Tankvorgangs sollte der Fahrer in der Nähe des PKW bleiben und kann in der Regel nicht gleichzeitig zum Bezahlen in die Station gehen. Wenn man die Zeit, die der Fahrer noch zum Anstehen und Bezahlen benötigt, einrechnet, kann man eine gesamte Tankzeit an einer Autobahntankstelle von etwa zehn Minuten annehmen.

Bei einer Stromtankstelle könnte die zweite Hälfte dieser Zeit entfallen, wenn die Zapfsäulen, wie es momentan angedacht ist, mit einer intelligenten und automatischen Abrechnungs- und Ladetechnik ausgestattet ist, sodass zusätzliche Einkäufe in der Tankstation schon während des Ladevorgangs erledigt werden können und damit die angenommenen zehn Minuten als reine Ladezeit genutzt werden können.

### **3.1.3 Sicherheit und Komfort**

Weitere wichtige Faktoren für den Nutzer von Fernstreckenstromtankstellen sind die Sicherheit und der Komfort. Die Bedienung der Tankstelle muss mindestens genauso einfach und sicher sein, wie die der klassischen Benzintankstellen.

Was die Sicherheit angeht, sind besonders Faktoren, wie die Schirmung gegen

---

<sup>25</sup> [BUND09]

<sup>26</sup> Nach [OIEA10]

elektrische Überschlge auf das Fahrzeug oder den Menschen oder die Sicherung gegen unbefugtes Ziehen des Steckers oder wegfahren während des Ladevorgangs wichtig.<sup>27</sup>

Zudem muss die Ladevorrichtung einfach zu bedienen sein, dass heißt, der Nutzer darf nicht die Möglichkeit haben, etwas falsch anzuschließen oder die Ladung zu starten, bevor das Auto angeschlossen ist.

Außerdem muss genau wie beim Benzin an allen Tankstellen Europa- oder sogar Weltweit der gleiche Anschluss existieren, sodass der Nutzer nicht zusätzliche Adapter mit sich führen muss oder an bestimmten Zapfsäulen gar keine Ladung vornehmen kann.<sup>28</sup>

Zudem sollte die Ladung intelligent und selbstständig ablaufen und nicht permanent vom Fahren überwacht werden müssen, wie es etwa beim Autogas der Fall ist.

### ***3.2 Technische Forderungen an den Ladevorgang***

Aus den in Kapitel 3.1 erarbeiteten Forderungen an den Ladevorgang aus Sicht des Nutzers sollen nun konkrete Forderungen an die technische Umsetzung der Ladeeinrichtung einer Fernstreckentankstelle erarbeitet werden. Mit Hilfe von Daten zu Verbrauchswerten von Elektroautos werden aus der Kombination von Reichweite und Ladezeit die Anforderungen an den Ladevorgang bestimmt. Dabei spielt vor Allem die theoretische Ladeleistung eine entscheidende Rolle. Diese wird errechnet und mit momentan realisierbaren Ladeleistungen verglichen.

#### **3.2.1 Herleitung der betrachteten Szenarien**

Die Rechnung wird in drei Szenarien durchgeführt. Zum einen der Höchstfall, der eintritt, wenn vom Kunden sowohl die 600 km Reichweite, als auch die zehn Minuten Hchstladedauer gefordert werden, zum zweiten der Mittelfall, in dem der Kunde entweder bei der Reichweite die Hälfte, also 300 km in Kauf nimmt, oder die doppelte Ladezeit, oder eine Kombination aus Ladezeit und Reichweite. Als drittes Szenario wird der Fall betrachtet, dass der Nutzer für die Kosten- und Umweltvorteile sowohl die halbe Reichweite, als auch die doppelte Ladezeit in Kauf nimmt. Die 300 km

---

<sup>27</sup> Nach [WATT10]

<sup>28</sup> Nach [SPIE10]

Reichweite werden aus dem Grund gewählt, dass beispielsweise auf Autogas umgerüstete Fahrzeuge oft Reichweiten von nicht viel mehr als 300 km haben. Die Reserve wird nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass diese nur selten in Anspruch genommen wird und daher nicht unbedingt in die Ladezeit einfließen muss. Die Ermittlung der Verbrauchswerte erfolgt an Hand bereits vorhandener Elektrofahrzeuge. Zu diesem Zweck wurden wie in Tabelle 2 zu sehen verschiedene Modelle betrachtet, bei denen entweder der Verbrauch, oder die Reichweite und speicherbare Energie angegeben waren, sodass der Verbrauch dazu errechnet werden konnte.

Modell	Verbrauch	Quelle
BMW E1	19 kWh, 250 km = 7,6 kWh / 100 km	[AURE10]
Chrysler EPIC	ca. 52 kWh, ca. 100 km = 52 kWh / 100 km	[EDIS99]
Mercedes Benz A-Klasse Zebra	30 kWh, 200 km = 15 kWh / 100 km	[ELFA10]
Ford E-Ka	28 kWh, 200 km = 14 kWh / 100 km	[ELEK10]
Lightning GT	35 kWh, 300 km = 11,7 kWh / 100 km	[RPON10]
Tesla Roadster	ca. 59 kWh, 380 km = 15,5 kWh / 100 km	[TESL10]
Elektrovaya Maya 100	40 kWh, 360 km = 11,1 kWh / 100 km	[GREE05]

**Tabelle 2: Auswahl historischer Elektroautos mit Verbrauch und Reichweite**

Das Resultat der Modelle ist ein Durchschnittsverbrauch von 18,2 kWh / 100 km. Lässt man allerdings den Ausreißer Chrysler EPIC, dessen Technik noch nicht ausgereift war, weg, so ergibt sich ein durchschnittlicher Verbrauch von 12,5 kWh / 100 km. Dabei sind allerdings viele Kleinwagen, die als Langstreckenfahrzeuge nicht unbedingt in Frage kommen, alleine schon auf Grund der geringen Höchstgeschwindigkeiten. Andererseits ist davon auszugehen, dass der Verbrauch mit zukünftiger Entwicklung noch stark gesenkt werden kann.

Daher soll hier der Durchschnittsverbrauch, der von Elektrovaya mit dem Maya 100 erreicht wurde hergenommen werden. Dieses Auto ist ein SUV, also durchaus ein angemessen großer PKW für Langstreckenfahrten, erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h, was in Deutschland nicht unbedingt für ein Autobahnfahrzeug ausreicht, aber in Anbetracht der Diskussion um das allgemeine Tempolimit und der bereits bestehenden Limits von 130 km/h in vielen Nachbarländern durchaus als akzeptabel für Langstrecken anzusehen ist. Zudem wird hier ein Lithium-Ionen Superpolymer Akku verwendet, der bei den älteren Fahrzeugen der Tabelle noch nicht zum Einsatz kommt.

Wenn man den Verbrauch noch mit den aktuellen Sportwagen Tesla Roadster und Lightning GT vergleicht, erscheint dieser Wert durchaus realistisch.

Zur weiteren Rechnung wird daher ein Wert von gerundet 11 kWh / 100 km verwendet.

### **3.2.2 Anforderung an die Ladung in Szenario 1**

Szenario 1 besagt, dass der Nutzer weder eine geringere Reichweite, noch eine deutlich längere Ladezeiten in Kauf nimmt. Das bedeutet eine Reichweite von 600 km mit einer Tankfüllung bei einer Ladezeit von zehn Minuten. Bei einem Durchschnittsverbrauch von 11 kWh / 100 km ergibt sich rechnerisch eine Energie von 66 kWh. Ob dieser Wert umsetzbar oder realistisch ist, ist hier nicht Gegenstand der Betrachtung, da dies eine theoretische Hochrechnung darstellt, die durchaus auch von anderen Ungenauigkeiten geprägt ist, wie einem höheren Verbrauch auf Grund eines größeren Gewichts wegen einer größeren Batterie von 66 kWh Energieinhalt.

Um eine Energie von 66 kWh in zehn Minuten, also etwa 0,167 Stunden vollständig zu laden, wäre eine Leistung von 396 kW nötig.

Diese Leistung ist nur dann sinnvoll anzunehmen, wenn man davon ausgeht, dass bei dem Verbrauch bereits Verluste beim Laden, Entladen und Kabelverluste eingerechnet sind.

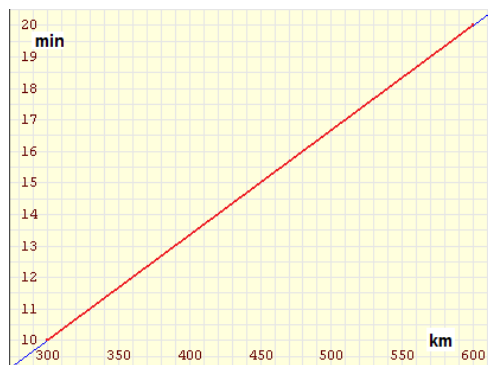
Mit einer realisierbaren Spannung von 400 V resultiert aus den errechneten 396 kW eine benötigte Stromstärke von 990 A. Diese Spannung wurde gewählt, da existierende Systeme wie Park & Charge diese bereits verwenden. Auf die Realisierbarkeit der Stromstärke wird hier nicht weiter eingegangen, dies geschieht in Kapitel 3.3.4, außerdem sollen die Szenarien rein rechnerisch erarbeitet und betrachtet werden. Auf Probleme wie Abwärme oder Induktion werden an dieser Stelle nicht eingegangen.

Zusammenfassend:

- 66 kWh
- 10 Minuten
- 396 kW Leistung
- 400 V
- 990 A

### **3.2.3 Anforderung an die Ladung in Szenario 2**

Szenario 2 beinhaltet die Annahme, dass der Nutzer zu Gunsten von Umwelt und Kosten auf die hohe Reichweite verzichtet oder eine längere Ladezeit in Kauf nimmt. Gerechnet wird hier mit einer Reichweite von 300 km und einer Ladezeit von zehn Minuten, oder einer Reichweite von 600 km und einer Ladezeit von 20 Minuten. Natürlich sind auch alle Werte dazwischen möglich. In Abb. 8 sind die möglichen Kombinationen von Reichweite und Ladezeit dargestellt, auf die diese Rechnung zutrifft. Somit wird bei einer Energie von 66 kWh und einer Ladezeit von 20 Minuten oder einer Energie von 33 kWh und einer Ladezeit von zehn Minuten eine Leistung von 198 kW nötig. Dies entspricht bei einer Spannung von 400 V einer Stromstärke von 495 A. Auch hier wird die Stromstärke bei einer Spannung von 230 V nicht betrachtet, da der Wert bereits hoch genug ist.



**Abbildung 8: Diagramm Reichweite – Ladezeit<sup>29</sup>**

Zusammenfassend:

- 33 kWh (66 kWh)
- 10 min (20 min)
- 198 kW Leistung
- 400 V
- 495 A

### 3.2.4 Anforderung an die Ladung in Szenario 3

Szenario 3 liegt die Annahme zu Grunde, dass der Nutzer sich mit einer Reichweite von 300 km zufrieden gibt, wie dies teilweise bei Autogasfahrzeugen der Fall ist.

Zudem nimmt er eine etwas größere Ladezeit von 20 Minuten in Kauf, in dem Bewusstsein der Umwelt zu helfen und günstig tanken zu können.

Bei dieser Annahme und 11 kWh / 100 km Verbrauch, benötigt der PKW eine Energie von 33 kWh. Bei einer Ladezeit von 20 Minuten oder etwa 0,33 h entspricht das einer benötigten Leistung von 99 kW. Das bedeutet bei einer Spannung von 400 V eine Stromstärke von 247,5 A. Der Vollständigkeit halber wird die Rechnung noch bei 230 V durchgeführt. Dies führt zu einer Stromstärke von etwa 430 A.

Zusammenfassend:

- 33 kWh
- 20 Minuten

<sup>29</sup> In Abbildung 8 sind die möglichen Kombinationen aus Reichweite und Ladezeit erkennbar, die sich mit einer Ladeleistung aus Szenario 2 erreichen lassen.

- 99 kW Leistung
- 400 V (230 V)
- 247,5 A (430 A)

### **3.2.5 Anforderung bezüglich Sicherheit und Komfort**

Neben den Anforderungen an die Leistung, um Ladezeit und Reichweite zu realisieren, bestehen auch Anforderungen an Sicherheit und Komfort.

Ein Aspekt der Sicherheit, die Absicherung gegen Überschlag oder Defekte des Kabels, betrifft in erster Linie den Stecker.

Dieser muss bestimmte Sicherheitsstandards, wie die IP-Schutzart 65 erfüllen. Das bedeutet er ist „komplett vor Staub, (...) Berührungen von stromführenden Teilen mit einem 1mm<sup>2</sup>-dünnen Draht sowie gegen Strahlwasser geschützt (...)“ [BRUN10; S. 14]. Er sollte über eine Verriegelung verfügen und beim Fahrzeug die Wegfahrsperre betätigen können. Zudem sollte auch eine Kommunikation mit dem Fahrzeug stattfinden, damit ein Schutz gegen Überladung und eine Abschaltung im Falle unvorhergesehener Ereignisse eintreten können. Ein weiterer Punkt ist die eindeutige Zuordnung der Anschlüsse. Diese muss unbedingt gegeben sein, damit Fehler bei der Bedienung vermieden werden können.

Es existieren noch einige weitere und genauere Anforderungen an die benötigte Steckverbindung, dies würde jedoch zu weit vom Thema dieser Arbeit wegführen.

Bezüglich des Komforts spielt die Standardisierung eine wichtige Rolle. Nur wenn europa- oder weltweit ein einheitlicher Steckertyp verwendet wird, kann jeder Nutzer auch an jeder Tankstelle tanken. Diesbezüglich erfolgte bereits eine Einigung, näher auf den gewählten Stecker wird in Kapitel 3.3.1 eingegangen.

Damit der Tankvorgang möglichst komfortabel abläuft und der Nutzer nicht während des Ladens an seinen PKW gebunden ist, muss eine Kommunikation nicht nur zur Sicherheit, sondern auch zur automatischen und intelligenten Abrechnung erfolgen, sodass der Nutzer außer dem Starten und eventuell Beenden des Tankvorgangs keine wesentlichen weiteren Aufgaben wahrnehmen muss und die Tankzeit für andere Tätigkeiten nutzen kann. Für diese Kommunikation ist ein ausgebautes Kommunikationsnetzwerk zu den Zapfsäulen und eine intelligente Steuerung und Abrechnung nötig.



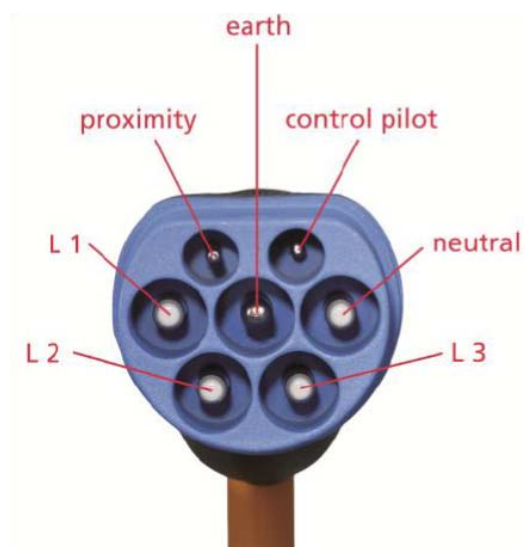
Mit diesem Thema beschäftigt sich zur Zeit ein Gremium der ISO und erarbeitet einen entsprechenden Entwurf für ein standardisiertes Kommunikationssystem. Da die Ergebnisse noch nicht öffentlich zugänglich sind und alle bisherigen Ansätze nach Einigung auf einen Standard keine signifikante Relevanz mehr haben werden, wird auf dieses Thema in dieser Arbeit ebenfalls nicht weiter eingegangen.

### ***3.3 Vergleich mit dem aktuellen Stand der Technik***

In diesem Kapitel wird ein Vergleich mit dem aktuellen Stand der Technik durchgeführt. Dabei soll besonders auf die mögliche Ladeleistung, aber auch auf die erwähnten Sicherheits- und Komfortaspekte eingegangen werden. Im Anschluss erfolgt der Vergleich der im Kapitel 3.2 ermittelten Werte und eine Bewertung, ob und wie realistisch die Umsetzung der geforderten Werte ist.

#### **3.3.1 Steckernorm – MENNEKES**

Die Anforderungen bezüglich Sicherheit und Komfort werden durch den Steckerentwurf des Steckerherstellers MENNEKES, der 2009 zur Entscheidung stand und von einem Gremium der größten Automobilhersteller und Energieversorger angenommen und abgesegnet wurde, weitgehend abgedeckt.



**Abbildung 9: MENNEKES-Stecker in der Draufsicht**

In Abbildung 9 ist der Stecker in einer Draufsicht zu sehen. „Die Stecker des Ladekabels sind berührungssicher isoliert und weisen an beiden Enden des Kabels die gleiche Form auf. Die Steckdosen am Fahrzeug sowie an der Ladestation sind ebenfalls fast identisch, sodass eine eindeutige und einfache Handhabung gesichert ist.“ [BRUN10; S. 12]

Dieser Stecker ist für eine Spannung von bis zu 400 V und eine Stromstärke von bis zu 63 A vorgesehen. Der dazu benötigte Kabeldurchschnitt beträgt 16 mm<sup>2</sup>, wird aber evtl. in einer zweiten Variante auf 4 – 6 mm<sup>2</sup> reduziert, die dann eine Stromstärke von 32 A aushalten soll. „Die Steckverbindung besitzt sieben Kontakte. L1, L2 und L3 sind die stromführenden Außenleiter, einen Neutralleiter, den voreilenden Schutzleiter (earth) sowie zwei zusätzliche Signalkontakte (proximity, control pilot), die für die Kommunikation notwendig sind.“ [BRUN10; S. 13]

Die Leitung „proximity“ dient der Aktivierung der Wegfahrsperre, um ein ungewolltes Bewegen des Fahrzeugs zu verhindern. Die Verbindung „control pilot“ dient der Identifikation des korrekten Anschlusses. Diese beschreibt den äußersten Punkt der Leitung und gibt somit Aufschluss über den korrekten Sitz des Kabels.

Zur Kommunikation stehen zum einen die Nutzung des bereits vorhandenen „control pilot“ und zum anderen eine Kommunikation über PLC<sup>30</sup> zur Debatte.

Die IP-Schutzklasse IP 65 wird erfüllt, zudem besitzt der Stecker eine „elektromechanische Verriegelung, die eine unerwünschte Unterbrechung des Ladevorgangs verhindert, indem die Stecker Verbindung des Ladekabels in der Ladestation und im Fahrzeug mechanisch verriegelt wird. Die Verriegelung wird durch ein elektrisches Signal ausgelöst, sobald der Ladevorgang gestartet wird. Ist der Ladevorgang abgeschlossen und damit das Ladekabel nicht mehr unter Last (...), wird die elektromechanische Verriegelung entriegelt. Im Falle von Systemfehlern, soll durch eine Vorrichtung, die nur im Fahrzeuginnen Raum betätigt werden kann, eine Notentriegelung ausgelöst werden.“ [BRUN10; S. 14]

Das System verfügt sowohl über einen Leistungsschutzschalter, der vor zu hohen Strömen schützt, als auch einen FI-Schutzschalter, der dem Schutz des Menschen dient. Weitere Normen, die der Stecker erfüllt können Abbildung 10 entnommen werden.

---

30 PLC: Power line communication – Transport von Daten über das stromführende Kabel

Norm	Beschreibung
IEC 61851-1:2001	Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge Teil 1: Allgemeine Anforderungen
IEC 62196-1:2003	Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Ladung von Elektrofahrzeugen – Teil 1: Leitungsgebundenes Laden von Elektrofahrzeugen bis 250A Wechselstrom und 400A Gleichstrom
IEC 61851-21:2001	Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge Teil 2-1: Anforderungen eines Elektrofahrzeuges für konduktive Verbindung an AC/DC-Versorgung
IEC 61851-22:2001	Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge Teil 2-2: Wechselstromladestation für Elektrofahrzeuge
USCAR und VDA AK-Richtlinie	Standards für KFZ-Steckerverbinder
SAE J1772	Conductive Charge Coupler

**Abbildung 10: Normenkonformität**

### 3.3.2 Ladestationen Level 1, 2, 3

Ein etablierter Hersteller von Ladestationen, Coulomb Technologies, Inc., und dessen europäische Tochter die 365 Energy Group verfügen bereits über eine Palette verschiedener Ladestationen. Deren Klassifizierung erfolgt in Levels, wobei Level 1 in Europa einer Ladestation mit 230 V und 16 A und damit einer Leistung von maximal 3,86 kW, also einer Station, die problemlos in einem privaten Haushalt installierbar ist, entspricht.

Level 2 ist die Klassifikation einer Ladestation mit ebenfalls 230 V, aber bereits 32 A Ladestrom, also einer maximalen Leistung von 7,36 kW. Zusätzlich befindet sich eine Schnellladestation in der Entwicklung, die für öffentliche Anwendungen konzipiert ist und mit einer dreiphasigen Spannung von 480 V und einer maximalen Stromstärke von 125 A arbeitet. Somit ist eine maximale Leistung von 60 kW möglich, was nach Firmenangaben eine ausreichende Ladung innerhalb weniger Minuten ermöglichen soll.



**Abbildung 11: Level 3 Schnellladestation**

Der Marktstart dieser Station soll in Q3 2010 erfolgen, worauf die Firma einen intensiven Ausbau einer Infrastruktur anstrebt.<sup>31</sup>

### **3.3.3 Vergleich der ermittelten Werte mit der Steckernorm und den Ladestationen**

Die ermittelten Werte sind schon auf den ersten Blick deutlich höher, als die Limits des MENNEKES-Steckers. Der Stecker ist mit maximal 63 A bei 400 V belastbar, was einer Leistung von 25,2 kW entspricht. Der kleinste ermittelte Wert, der in Szenario 3 angenommen wurde, beträgt 99 kW, also etwa das vierfache. Natürlich wäre auch eine Stromstärke von 125 A bei 400 V möglich, was dann allerdings mit einem Kabelmindestquerschnitt nach DIN 57100 Teil 523/VDE<sup>32</sup> von 35 mm<sup>2</sup> einhergeht. Dieser könnte dann 50 kW Leistung übertragen, also etwa die Hälfte.

Um also Szenario 3 zu erfüllen, müsste nach oben genannter DIN-Richtlinie ein Kabel mit einem Mindestquerschnitt von 95 mm<sup>2</sup> (für 250 A, 100 kW) verwendet werden.

Um das Szenario 2 zu erfüllen, wird bereits ein Querschnitt von 300 mm<sup>2</sup> benötigt, für Szenario 3 existiert laut DIN 57100 Teil 523/VDE kein Querschnitt mehr, der diese

<sup>31</sup> Nach [365E09], [COUL10a] und [COUL10b]

<sup>32</sup> Nach [DIN571]

Bedingungen erfüllt. Die Möglichkeit mehrerer Anschlüsse kann in Betracht gezogen werden, führt aber in Summe zu gleichen Querschnitten und wird daher nicht weiter betrachtet.

Der Vergleich mit den existierenden Stationen von Coulomb Technologies zeigt, dass selbst die vorhandene Level 2 Ladestation mit einer Leistung von 7,36 kW<sup>33</sup> weit von einer Ladung in Minuten entfernt ist. Eine komplette Ladung des Szenario 3, also von 33 kWh, würde mit dieser Station immer noch einen Zeitbedarf von etwa 4,5 Stunden bedeuten.

Die Ladung mit der angekündigten Level 3 Station soll mit 60 kW arbeiten können. Sollte dies so realisiert werden, so ergäbe sich für die Szenario 3 Ladung von 33 kWh eine Ladezeit von 33 Minuten, also etwa einer halben Stunde. Für das Szenario 1 oder 2, also einer Ladung von 66 kWh, bedeutet die Level 3 Station einen Zeitbedarf von 66 Minuten, also etwas mehr, als einer Stunde.

#### **3.3.4 Fazit - Realisierbarkeit**

Was den Stecker betrifft, kann man sagen, dass selbst Szenario 3 mit vorhandener Technik schwer zu realisieren ist. Das Kabel würde einfach zu dick und zu schwer, vor Allem die Handhabung und damit der Komfort würden derart leiden, dass eine Akzeptanz von Nutzerseite nicht zu erwarten ist. Dennoch wird hier das Limit der Realisierbarkeit betrachtet.

Ein gerade noch umsetzbares Szenario ist eine Ladestation mit einem APD 1 Pol Fingerschutz-Stecker<sup>34</sup>, der ein Limit von 630 V bei maximal 245 A zulässt, dieses allerdings auch nur bei 25° C, was in der Praxis in einem geschlossenen, klimatisierten Raum durchgeführt werden müsste, da die Bedingung nicht ganzjährig gegeben ist.



**Abbildung 12: APD 1-POL Fingerschutz-Stecker**

---

<sup>33</sup> Siehe Kap. 3.3.2

<sup>34</sup> Nach [AUEL10]

Zudem lässt dieser Stecker einen maximalen Leitungsquerschnitt von 50 mm<sup>2</sup> zu, was laut oben genannter DIN-Norm zu einer maximalen Stromstärke von 168 A führt. Mit den maximal angenommenen 630 V ergibt sich so eine maximale Leistung von 105,84 kW, was in einer 20-Minütigen Ladung einer Energie von 35,28 kWh entspricht und mit dem angenommenen Verbrauch von 11 kWh / 100 km einer Reichweite von 321 km entspricht. Umgekehrt könnte eine Ladung für eine Reichweite von 300 km in knapp 19 Minuten erfolgen.

Die daraus resultierende Forderung ist die Erhöhung der Spannung. Im Niederspannungsbereich sind bis zu 700 V in Industrienetzen möglich<sup>35</sup>, eine Erhöhung auf 650 V ist also realisierbar.

In Bezug auf die bereits existierenden Ladestationen kommt man zu dem Ergebnis, dass die existierende Technik weit von der Realisierung der Szenarien entfernt ist. Selbst die Ladung von 33 kWh in Szenario 3, bzw. 2, sind nur in etwa 4,5 Stunden zu realisieren, was bei einer Stromsäule zu Hause oder am Arbeitsplatz ausreicht, aber für eine Ladung im Fernstreckenverkehr nicht anwendbar ist.

Hoffnung macht die neue Entwicklung der Level 3 Station. Damit ist eine Ladung von 33 kWh bereits in einer halben Stunde möglich, was von der Erfüllung der 20 Minuten in Szenario 3 zwar noch über 50% entfernt ist, aber eine deutlich Annäherung im Vergleich zu 4,5 Stunden darstellt. Wenn diese Entwicklung noch einen Schritt in Richtung höherer Spannung unternimmt, ist Szenario 3 fast realisierbar. Die anderen beiden Szenarien sind allerdings noch weit davon entfernt, mit verfügbarer Technik umgesetzt zu werden.

---

<sup>35</sup> Siehe Kapitel 2.1.2

### **3.4 Probleme**

Das Resultat aus Kapitel 3.3 führt zu der Schlussfolgerung, dass zur Realisierung der betrachteten Szenarien eine weitere Erhöhung der möglichen Ladeleistung erforderlich ist, also entweder der Spannung oder der Stromstärke. Daraus resultieren jedoch Probleme, die bei Nutzung der aktuellen Technik noch nicht vollständig gelöst sind, sich aber bei einer weiteren Erhöhung der Ladeleistung noch verschärfen. Auf diese Probleme geht Kapitel 3.4 im Einzelnen ein, wobei diese Betrachtung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, vielmehr sollen die größten und offensichtlichsten Herausforderungen und Schwierigkeiten betrachtet werden.

#### **3.4.1 Kabel und Stecker - Handhabung**

Wie in Kapitel 3.3.4 dargestellt, wird selbst zur Umsetzung von Szenario 3 bei der Annahme einer Spannung von 630 V und einer Leistung von 168 A ein Kabelquerschnitt von 50 mm<sup>2</sup> benötigt. Das entspricht etwa einem Kabeldurchmesser von 8 mm, mit Isolierung liegt der Durchmesser eines solchen Kabels bei etwa 15 mm. Das ist noch handhabbar, verringert allerdings den Komfort gegenüber etwa einem Mennekes-Stecker mit einem Querschnitt von 16 mm<sup>2</sup> und somit einem Durchmesser einschließlich Isolierung von etwa 8 bis 9 mm. Vor allem das Gewicht, das etwa bei dem dreifachen des Mennekes Kabels liegt, stellt eine Einschränkung dar.

Nimmt man nun an, die Spannung würde nicht auf 630 V erhöht, sondern bliebe bei 400 V, so müsste der Mindestquerschnitt nach Kapitel 3.3.3 bereits 95 mm<sup>2</sup> betragen, was ein Kabel von etwa 20 mm Außendurchmesser zur Folge hat. Mit einer Dichte von etwa 8,92 g/cm<sup>3</sup> ergibt sich bei einer Länge von beispielsweise 2 Metern ein Gewicht von etwa 1,7 kg, von denen der Nutzer bei einseitiger Befestigung etwa 850 g heben und bewegen muss. Diese Größenordnung ist durchaus noch handhabbar.

Geht man nun theoretisch zu Szenario 2 über, das nach Kapitel 3.3.3 einen Mindestquerschnitt von 300 mm<sup>2</sup> erfordert, ergibt sich ein anderes Bild. Mit einem Durchmesser von etwa 30 bis 40 mm entspricht ein solches Kabel in der Handhabung eher einem Benzin- oder Gasschlauch einer Tankstelle, als einem Stromkabel.

Mit der Kupferdichte von 8,92 g/cm<sup>3</sup> und einer Länge von 2 Metern ergibt sich ein

Gewicht von etwa 5,3 kg. Rechnet man noch die Isolierung hinzu, erreicht man durchaus ein Gewicht von knapp 6 kg. Das bedeutet ein Gewicht, das der Nutzer bei einseitiger Befestigung des Kabel halten und bewegen muss von etwa 3 kg. Zudem muss auch der Anschluss am PKW diese 3 kg während des Ladevorgangs aushalten. Eine Lösungsmöglichkeit kann eine weitere unterstützende Haltevorrichtung darstellen. Für Szenario 1 existiert kein Kabelquerschnitt, der für die benötigte Ladeleistung groß genug ist, daher kann hier kein Gewicht betrachtet werden.

### **3.4.2 Netzanschluss – Spannung und Leistung des Anschlusses**

Eine Tankstelle, die Ladeleistungen von über 100 kW realisieren und Ladestationen für mehrere PKW zur Verfügung stellen soll, benötigt verfügbare Leistungen von über einem MW, was auf keinen Fall mehr über einen Niederspannungsanschluss gedeckt werden kann. Nach Aussagen eines zuständigen Mitarbeiters der Stadtwerke Karlsruhe im Telefoninterview sind im Niederspannungsnetz durchaus noch 200 A auf einer halben km Leitung, bei Erdkabeln auch etwas mehr realisierbar, dies entspricht bei 400 V etwa 80 kW.

Für einen Anschluss im MW-Bereich muss ein Mittelspannungsanschluss verwendet werden. Dieser sollte dann entsprechend für die 1000 kVA Ladeleistung und zusätzliche Leistung für die Niederspannungsversorgung der restlichen Tankstelle Leistung bereitstellen.

Ein solcher Anschluss ist problemlos realisierbar, einige große Raststätten sollen bereits über entsprechende Anschlüsse verfügen.

Die Kosten sind laut Aussagen des Mitarbeiters nicht pauschal abschätzbar, sie hängen vor allem von der Nähe des nächsten entsprechenden Netzanschlusses ab. Wenn im näheren Umfeld eine entsprechende Infrastruktur vorhanden ist, entstehen bei einem Mittelspannungsnetzanschluss Kosten von etwa 50.000 bis 100.000 €. Müssen allerdings extra Leitungen über mehrere Kilometer gelegt werden, wird dies deutlich teurer.

Ein entsprechend dimensionierter Anschluss ist demnach realisierbar, wenn auch unter einem erhöhtem Kostenaufwand.



### 3.4.3 Batterieprobleme

Bei jedem Ladevorgang entsteht Wärme. Diese hält sich bei kleinen Strömen und Leistungen noch in Grenzen, wird aber umso stärker, je größer die Ströme und damit die Leistung sind. Bei einem PKW, der mit einer Größenordnung von 100 kW geladen werden soll, ist dieses Problem erheblich.

Die Wärme kann von einer einfachen Erwärmung bei schneller Ladung bis hin zu einer Überhitzung, Schmelzung der Kunststoffhülle oder sogar einer Explosion führen, wenn es zusätzlich zur Bildung explosiver Gase kommt. Eine Kühlung ist zwar möglich, geht allerdings mit einem zusätzlichen Energieverbrauch einher. Zudem wird bei einer sehr starken Ladung eine schnelle Erhitzung in der Batterie erfolgen, die von außen schwer zu kühlen ist.

Selbst wenn die Abführung der Wärme gelingt, werden dennoch die anderen Folgen, wie Korrosion, vorzeitige Alterung und Explosions- oder Gasaustrittsgefahr nicht gelöst.

Das besondere Augenmerk liegt hier auf Li-Ion Batterien, da diese die höchste Energiedichte besitzen und damit das wirtschaftlichste Gewichts-Energie-Verhältnis besitzen. Nach Isidor Buchmann<sup>36</sup> ist die Ultra-Schnellladung mit Li-Ion Batterien jedoch nicht möglich. Das Hauptproblem liegt in der starken Hitze- und Gasentwicklung bei einem Ladevorgang mit zu hoher Stromstärke. Daneben führt eine zu schnelle Ladung auch zu übermäßiger Alterung und Verschleiß. Auf Details soll hier nicht weiter eingegangen werden, dafür wird der Artikel von Isidor Buchmann empfohlen, in dem er ausführlich über die Probleme der Ultra-Schnellladung berichtet. Als Resultat wird die Erkenntnis übernommen, dass die herkömmlichen Li-Ion Batterien nicht für eine Ladung im angestrebten Bereich von mehr, als 100 kW geeignet sind.

---

<sup>36</sup> [BUCH05a] und [BUCH05b]

### **3.5 Lösungen**

Für Probleme, die mit dem aktuellen Stand der Technik nicht lösbar sind, werden Lösungen erarbeitet und vorgestellt.

#### **3.5.1 Lösungsansätze zu den Problemen von Seite der Tankstelle**

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, wäre ein Kabel für die Leistung, die zur Umsetzung von Szenario 3 benötigt wird, durchaus sowohl von Seite des Kabels, als auch von Seite des Steckers realisierbar. Voraussetzung ist, dass mit etwas höheren Spannungen im Bereich bis 630 V gearbeitet wird. Die Umsetzung von Szenario 1 ist dagegen momentan nicht realisierbar und soll daher hier nicht weiter diskutiert werden.

Bei der Umsetzung von Szenario 2 hingegen ergeben sich zwar Herausforderungen, was allerdings nicht bedeutet, dass eine Umsetzung ausgeschlossen ist. Das Problem liegt zum einen in dem großen Kabeldurchmesser, dem daraus resultierenden hohen Gewicht und der schlechten Handhabbarkeit und zum anderen in der Dimensionierung eines passenden Steckers.

Das Problem der Handhabbarkeit könnte durch ein deutlich kürzeres Kabel gelöst werden. Geht man davon aus, dass sich für die Platzierung der Ladeöffnung bei Elektroautos ein Standard etablieren wird, so wäre es möglich, die Position der Ladestation so zu wählen, dass die Kabelausgabe in einer Entfernung von beispielsweise maximal 50 cm von der Anschlussstelle am PKW entfernt ist, sodass mit der Kabellänge von 50 cm das Gewicht auf 25%, also knapp 1,5 kg sinkt und somit bei einseitiger Befestigung das Gewicht, das zu halten ist, nur noch bei etwa 750 g liegt. Dies wäre mit einer Arretierungsvorrichtung am PKW durchaus umsetzbar.

Das andere Problem stellt die Dimensionierung und Wahl eines Steckers dar. Auf dem Markt existieren bereits Hochstromstecker für die Industrie, allerdings sind dies Einleiterstecker von nicht zu unterschätzender Größe. Eine solcher Anschluss wäre also nach dem momentanen Stand nur durch mehrere separate Anschlüsse möglich und für einen einfachen Nutzer schwer handhabbar.

Vorstellbar wäre noch ein System, bei dem die Verbindung nicht manuell vorgenommen wird, sondern mechanisch automatisch erfolgt. Dazu wäre eine anspruchsvolle Steuerungstechnik nötig, die vor Allem ein erhöhtes Sicherheitsrisiko darstellt und mit erhöhter Anfälligkeit einhergeht. Denkbar ist eine Art „Dockingstation“, die beispielsweise einen Anschluss auf der Unterseite des PKW nutzen könnte.

### **3.5.2 Lösungsansätze zu den Problemen von Seite der Batterie**

Mit den normalen Li-Ion Batterien wird eine Schnellladung im geforderten Bereich nicht realisierbar sein. Es gibt dennoch Lösungsansätze. So entwickelte vor einigen Jahren das Massachusetts Institute of Technology die Li-Ion Technologie zu einem Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator weiter, indem ein glasartiger Lithium-Phosphat-Überzug an der Oberfläche angebracht wurde, der die Lithium-Ionen beschleunigt und damit eine deutlich schnelle Ladung und Entladung ermöglicht. So wurde im Versuch im kleinen Maßstab ein Akku innerhalb von 10 bis 20 Sekunden vollständig ge- und entladen werden, der vorher etwa 6 Minuten benötigte.<sup>37</sup>

Die Entwickler gehen davon aus, dass diese Akkutechnologie die Batterien nicht erheblich verteuern wird, da sie im Herstellungsprozess nicht besonders aufwendig sind. Eine Markteinführung soll bereits in zwei bis drei Jahren realisierbar sein, da die Technologie keine Neuentwicklung, sondern eine Adaption der etablierten Li-Ion-Technologie darstellt.

Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass das Material der Batterie deutlich weniger ermüdet, als bei den herkömmlichen Li-Ion Batterien.

Diese Entwicklung ist bereits im Anwendungsstadium. So ist beispielsweise der LUIS 4U green, ein PKW der LUIS Motors GmbH, bereits mit einem Lithium-Eisen-Phosphat-Akku ausgestattet und soll laut Hersteller eine Reichweite von 200 km bei einer vollständigen Ladezeit von 20 Minuten erreichen. Zudem soll ein Explosionsrisiko auf Grund der Akkutechnologie nicht mehr gegeben sein.<sup>38</sup>

---

<sup>37</sup> Nach [TIMM09]

<sup>38</sup> Nach [LUIS10]



**Abbildung 13: LUIS 4U green**

Mit dieser Akkutechnologie sind Schnellladungen des Szenario 3 nicht mehr ausgeschlossen und werden in den nächsten Modellgenerationen vermutlich Einzug halten.

### **3.5.3 Realisierbarkeit und Grenzen**

Die Lösungsansätze bezüglich Kabelgewicht und Handling, sowie die Probleme der Batterie sind wie in den vorangegangenen Abschnitten zu sehen ist für eine Ladung nach Szenario 3 anwendbar und technisch nicht mehr weit von den heutigen Anwendungen entfernt.

Will man allerdings ein Szenario 2 oder sogar 1 erreichen, so ist dies mit erheblichen technischen Herausforderung verbunden. Für ein Szenario 2 stellt vor Allem das Handling der gewaltigen Kabel und die Gefahr einer derart hohen Leistung ein erhebliches Problem dar. Auch die Batterietechnik ist momentan gerade dabei an die Anforderungen von Szenario 3 heranzureichen, ein Szenario 2 oder 1 ist momentan noch nicht realisierbar.

Der Lösungsansatz der automatischen gesteuerten „Dockingstation“ wäre sicherlich ein Ansatz, der verfolgt werden kann, sobald die Akkutechnologie die Nutzung ermöglicht. Interessant ist dieses Konzept besonders für die Umsetzung von Szenario 1 oder 2, da Szenario 3 auch mit Kabeln umsetzbar ist. Außerdem sollte auch diese Lösung auf Alternativen geprüft werden, derer es sicherlich nicht mangelt.

Von der Umsetzung eines Wunschszenarios 1, das annähernd mit den heutigen Reichweiten und Tankzeiten konkurrieren kann, ist man noch weit entfernt und es stellt sich die Frage, ob die Realisierung einer solchen Ladung überhaupt realistisch ist, oder einfach an den physikalischen Grenzen der Akkutechnologie und Leitungsfähigkeit der Kabel scheitert.

Daher lohnt sich der Blick über den Tellerrand, was sich für Alternativen zur klassischen Aufladung eines festen Speichers im PKW mit Hilfe ortsfester Ladestationen anbieten.

## **4 Alternativen**

Zur klassischen Aufladung wie in Kapitel 3 beschrieben existieren zahlreiche Alternativen.

Ziel dieses Kapitels ist es, einige davon vorzustellen und deren Vor- und Nachteile aufzuzeigen. Zudem erfolgt eine Bewertung hinsichtlich der Realisierbarkeit und der Praktikabilität.

Genauer betrachtet werden dabei das Konzept Akkutausch, Flüssigkeitswechsel, Brennstoffzelle und das Szenario eines Zweitwagens oder anderen Fortbewegungsmittels für Langstreckenfahrten. Auf das Konzept der induktiven Ladung wird nicht weiter eingegangen, da dieses nicht die Probleme von Seiten des PKW lösen kann und im Prinzip nur eine Substitution der Steckverbindung darstellt, was bei langen Lade- und Standzeiten aus verschiedenen Gründen, wie Komfort auf Grund der wegfallenden Handhabung des Kabels oder der Sicherheit gegen das unbefugte Entfernen des Kabels, Sinn macht, aber für die Ultra-Schnellladung keinen wesentlichen Vorteil bietet.

### ***4.1 Akkutausch***

Da das Konzept Akkutausch eher in den Bereich der Geschäftsmodelle, als der technischen Realisierung einer Fernstreckenstromtankstelle einzuordnen ist, soll es hier nur kurz erwähnt werden und vor Allem aus Sicht der technischen Vor- und Nachteile beleuchtet werden. Für einen detaillierten Einblick in das Thema Geschäftsmodell der Firma Better Place, die dieses Verfahren in einem Pilotprojekt in Israel anwendet, wird auf die parallel entstandene Studienarbeit von Andreas Quentin, „Wirtschaftliche Betrachtung von Elektrofahrzeugen mit Schwerpunkt EV-Infrastruktur und neue Geschäftsmodelle“, verwiesen.

Das Grundprinzip ist die Idee, anstatt einen Akku mit hoher Leistung schnell zu laden, was nicht ohne Weiteres möglich ist und einige Nachteile mit sich führt, wie Kapitel 3 zu entnehmen ist, diesen in kurzer Zeit auszutauschen und ihn anschließend ortsfest im gesünderen langsamen Verfahren zu laden. Für den Nutzer entstehen dabei deutlich kürzere Wartezeiten, da diese nur noch aus der reinen Austauschzeit besteht und nicht mehr aus der Ladezeit. Diese soll laut Hersteller im Bereich von ein bis zwei Minuten

liegen, in einem Artikel wird über 45 Sekunden in einer Demonstration gesprochen.<sup>39</sup>

Dieses Konzept klingt im ersten Moment überzeugend, besitzt aber einige wesentliche Schwächen.

Ein Nachteil liegt in dem großen Anteil an Mechanik und Steuerung, der für einen solchen Austauschroboter benötigt wird. Jede Mechanik ist anfällig für Verschleiß und technische Fehler und birgt bei einem Wechsel von über hundert Kilogramm schweren Batterieblocks durchaus ein gewisses Risiko. Dieses kann natürlich durch die Reifung der Technik und hohe Sicherheitsstandards reduziert werden, wird aber nicht komplett vermeidbar sein.

Die Hauptprobleme liegen an einer anderen Stelle. So ist es unwahrscheinlich, dass sich die Automobilhersteller die genaue Bauform, Größe und das Gewicht ihrer Akkus vorschreiben lassen. Das wäre aber nötig, um ein Akkutauchsystem zu etablieren. Eine Vorratshaltung von mehr als vier oder fünf Akkutypen würde enormen Druck auf die Kosten und die Vorratshaltung ausüben.

Außerdem ist der Akku ein wesentliches Differenzierungsmerkmal eines PKW. Dieser generiert einen erheblichen Anteil am Wettbewerbsvorteil der Hersteller. Eine Vorschrift des Formfaktors stößt voraussichtlich bei vielen Herstellern nicht auf Akzeptanz.

Der Akkutauch muss auch vom Nutzer akzeptiert werden. Wie sieht der Kunde den Umstand, dass er den Akku nicht besitzt, sondern nur gemietet hat und dass er bei jedem Tausch einen anderen, vielleicht schon älteren Akku erhält, der unter Umständen bereits eine etwas geringere Energie besitzt? Zudem ist die Frage der Haftung nicht zu vernachlässigen. Was passiert im Falle eines Unfalls oder von selbstverursachter Beschädigung wegen einer Geländefahrt oder eines anderen Umstandes?

Vor Allem sieht das Geschäftsmodell zur Zeit vor, den Akku zu refinanzieren, indem die Firma Better Place eine Nutzungspauschale pro gefahrenem Kilometer erhebt, die etwa den Kosten eines günstigen Benzinfahrzeuges entspricht. Die Frage ist, ob der Nutzer dieses Konzept dann nutzt, wenn er finanziell zwar keine Nach-, aber auch keine Vorteile daraus ziehen kann. Natürlich kann bei einer gewissen Fahrleistung pro Jahr dieses Prinzip zu einem wirtschaftlichen Vorteil führen, aber gerade bei großen Fahrleistungen kann es sein, ein selbst gekaufter Elektro-PKW ist trotz der hohen Anschaffung günstiger, da der Kilometerpreis durch den günstigen Strompreis oder eine eigene Solartankstelle mit Solarzellen auf der Garage deutlich niedriger ist, als der eines Benzinfahrzeuges.

---

39 Nach [AUMO09] und [NYTI09]

Das Konzept des Akkutaushes ist sicherlich eine gute Idee, hat aber so viele offenen Fragen und Nachteile, vor Allem in der Akzeptanz, sodass es fraglich erscheint, ob es in Zukunft marktfähig sein wird. Vielleicht ist die Rechnung in recht kleinen, abgeschlossenen Räumen eher realistisch, aber bei den vorhandenen Alternativen ein flächendeckendes Netz in Deutschland aufzubauen scheint zumindest zum jetzigen Zeitpunkt als nicht sinnvoll und eher unwahrscheinlich.

#### 4.2 Flüssigkeitswechsel

Das Konzept, dass hier allgemein als Flüssigkeitswechsel bezeichnet wird, ist ein Interessantes, bereits in verschiedenen Formen in der Entwicklung Befindliches, bei dem die chemischen Eigenschaften der Batterie genutzt werden und der Versuch unternommen wird, nicht die Batterieladung beim Tankvorgang zu erneuern, sondern direkt das Resultat des Ladevorgangs, die Wiederherstellung der Chemischen Flüssigkeiten, die den Strom an den PKW abgeben, herbeizuführen, indem diese direkt ausgetauscht werden.

Ein solches System stellt die Redox-Flow-Zelle dar. Bei ihr besteht das „aktive Material aus in einem flüssigen Elektrolyten gelösten Salzen. Der Elektrolyt wird in Tanks gelagert und bei Bedarf einer zentralen Reaktionseinheit für den Lade- oder Entladeprozess mittels Pumpen zugeführt.“ [ISEA10]

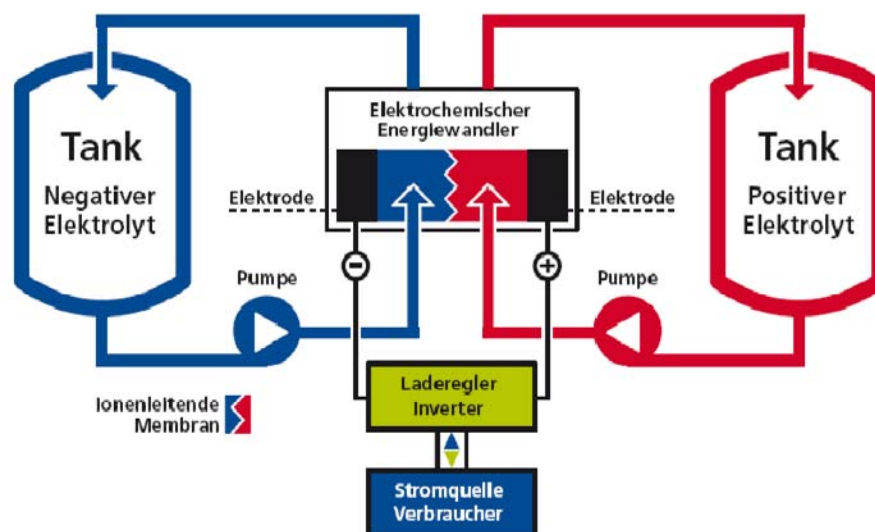


Abbildung 14: Prinzip der Redox-Flow-Zelle



Dabei liegt die Energiedichte allerdings nur etwa auf dem Niveau von Bleiakkus. Es werden verschiedene Kombinationen von Salzen getestet, wobei momentan eine besonders interessante die von Vanadium in verschiedenen Wertigkeiten ist. Die sogenannte Vanadium-Redox-Batterie hat den Vorteil, dass in beiden Zellen Vanadium verwendet werden kann und somit keine Verunreinigung des Materials bei der Entladung erfolgt. Die Elektrolytflüssigkeiten werden in separaten Tanks gelagert und können wie auch Benzin in Tankfahrzeugen transportiert und in Tanks gelagert werden. Für die Elektromobilität würde das bedeuten, dass an Tankstellen wie gewohnt Flüssigkeiten getankt werden können, nur mit dem Unterschied, dass gleichzeitig die verbrauchte Flüssigkeit abgepumpt werden muss und in einem separaten Tank aufgefangen wird. Ein Recycling des Elektrolyts ist vollständig möglich, sodass keine erwähnenswerte Verluste entstehen. Der Wirkungsgrad soll bei etwa 80 bis 85 % liegen, wenn man die Pumpleistung und andere Verbraucher im kompletten Kreislauf berücksichtigt, erhält man Wirkungsgrade von etwa 75 %. Auch eine Selbstentladung soll nicht auftreten .

Da die Technik noch nicht lange erprobt ist, können keine zuverlässigen Aussagen über die Lebensdauer der Elektroden und des Elektrolyts gemacht werden, aber es wird von Lebensdauern von 13.000 Ladezyklen gesprochen. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die meisten Probleme der herkömmlichen Batterien umgangen werden können. So ist beispielsweise eine Komplettentladung überhaupt kein Problem und auch ein nachlassender Energieinhalt ist nicht zu befürchten, da bei jedem Tankvorgang das Elektrolyt vollkommen ausgetauscht wird.

Der Nachteil liegt bisher vor allem in der deutlich niedrigeren Energiedichte, als von beispielsweise Li-Ion-Technologie, wobei Forscher im Augenblick an der Weiterentwicklung arbeiten und davon ausgehen, dass eine Energiedichte, wie die einer Li-Ion-Zelle bald erreicht sein wird.

Diese Art der Batterie stellt den komplett neuen Ansatz dar, nicht die Batterie als ganzes zu betrachten, wie es bei der herkömmlichen Ladung oder auch beim Batterietausch getan wird, sondern noch weiter ins Detail zu gehen und die Elektrolytflüssigkeit innerhalb der Batterie zu tauschen. Diesen Ansatz weiter zu verfolgen lohnt sich auf jeden Fall, da er auch für die Infrastruktur einen erheblichen Vorteil bietet, da die Aufbereitung zentral mit entsprechender Energieversorgung erfolgen kann, was auch Leitungs- und Übertragungsverluste umgeht, und die Distribution des Energieträgers, hier der aufbereiteten Elektrolytflüssigkeit, kann wie auch beim Benzin über Tanklaster

und Leitungen erfolgen. Auch für die Umweltverträglichkeit wäre eine solche Lösung positiv, da das Recycling zu annähernd 100 % erfolgt, und denkt man weiter, so würde sich diese Technik auch dazu eignen, das Recycling in wärmere und sonnigere Gegenden zu verlegen, wo dies komplett aus Solarstrom erfolgen könnte.<sup>40</sup>

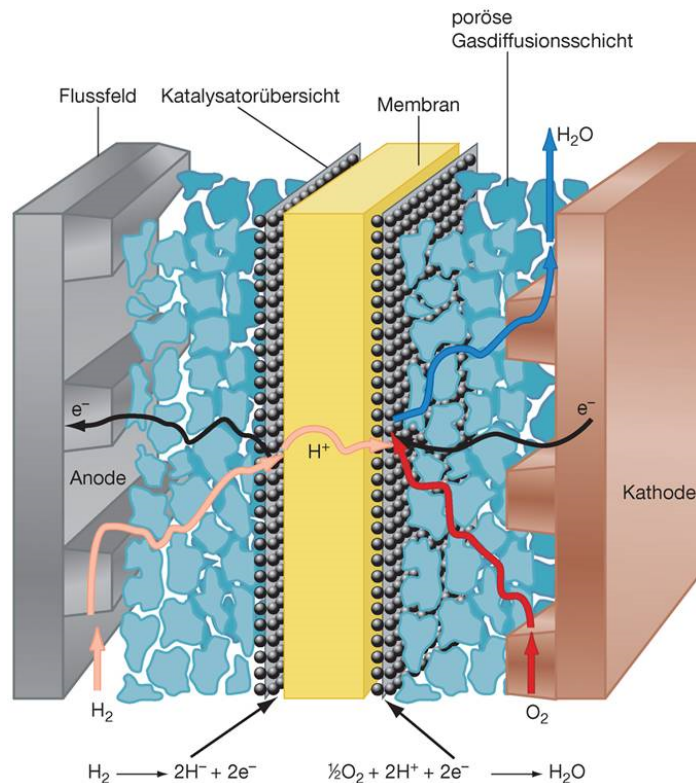
### ***4.3 Brennstoffzelle***

Im Prinzip könnte man die Brennstoffzelle auch zu den Flüssigkeitswechselsystemen zählen, da diese aber schon seit längerer Zeit im Fokus steht und sich bereits im praktischen Erprobungsstadium befindet, wird dieser Technologie ein eigenes Teilkapitel gewidmet. Auch hier stehen bei der Betrachtung eher die Realisierbarkeit und die Vor- und Nachteile im Mittelpunkt, als eine detaillierte Darstellung und Bewertung der technischen Funktion. Daher wird das Wirkungsprinzip eher oberflächlich angerissen.

Das Grundprinzip der Brennstoffzelle ist die elektrochemische Umsetzung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, was zu einem Fluss von Elektronen führt und damit einfach ausgedrückt Strom liefert. Dabei existieren verschiedene Arten von Brennstoffzellen, auf die hier allerdings nicht genauer eingegangen wird, da das Grundprinzip, wie es hier beschrieben ist, auf alle Typen zutrifft.

---

<sup>40</sup> Nach [ISEA10]



**Abbildung 15: Brennstoffzelle**

Man kann die benötigte Energie in Form von Wasserstoff mitführen und zusammen mit Sauerstoff, der in der Luft ausreichend vorhanden ist, jederzeit elektrische Energie erzeugen. Dabei entsteht weniger Wärme, als bei einem Verbrennungsmotor und keine schädlichen Abgase. Das Einzige „Abfallprodukt“ ist Wasser. Da dieses in keiner Form verunreinigt ist, kann es einfach entsorgt werden, sprich entweder per Sammel-tank bewahrt und an vorgesehenen Stellen abgelassen werden oder einfach während der Fahrt auf die Straße tropfen.

Auch bezüglich des Tankvorgangs sind ganz klar Vorteile gegenüber der Batterieladung vorhanden. Statt einer Ladezeit fällt hier wie beim klassischen Benzinfahrzeug nur eine Tankzeit an. So positiv eine solch umweltfreundliche Technologie klingt, so zahlreich sind die Probleme.

Wasserstoff ist im Gegensatz zu Benzin ein Gas, und im Gegensatz zu Autogas (LPG) durch leicht erhöhten Druck nicht zu verflüssigen. Um Wasserstoff in eine flüssige Form zu überführen, ist eine Temperatur von  $-253^\circ\text{C}$  nötig, was einen Energiebedarf für die Verflüssigung erfordert, der etwa einem Drittel der gespeicherten Energie entspricht. Damit wird ein stark reduzierter Wirkungsgrad erreicht.

Andere Speicherungsmethoden sind die gasförmige Speicherung unter extrem hohem

Druck, möglich sind bis zu 200 bar, mit extrem druckresistenten Flaschen auch bis zu 350 bar, oder die Speicherung in anderen Stoffen, wie Metall oder Graphitfasern.

Die Speicherung unter hohem Druck benötigt einen Energieaufwand zur Druckerzeugung und führt zu einem erhöhten Risiko. Gerade bei Betankungsvorgängen besteht Gefahr, wenn mit hohem Druck gearbeitet wird. Auch der Druckbehälter stellt zu jeder Zeit ein Risiko dar, da dieser bei Unfällen oder Beschädigung explodieren kann.

Die Speicherung in anderen Stoffen, wie Metallhydridspeichern oder Graphit-Nanofasern haben den Nachteil eines sehr komplizierten Handlings und einem ebenfalls erhöhten Energiebedarf zur Speicherung. So erfolgt bei Metallhydridspeichern die Einlagerung des Wasserstoffs in Metalle, wie Palladium oder Magnesium, zwar exotherm, also unter Abgabe von Wärme, die dann andersweitig genutzt werden könnte, aber für die Wiedergewinnung des Wasserstoffs muss die gleiche Energie als Wärme zugeführt werden, was sich im PKW als unvorteilhaft erweist, zumal Metallhydridspeicher für PKW schon auf Grund der geringen massenspezifischen Speicherdichte kaum in Frage kommen.

Graphit-Nanofaserspeicher werden trotz einer extrem hohen Speicherdichte, die zu enormen Reichweiten führen könnte, momentan auch keinen Einzug in den PKW finden, da sie Ladezeiten wie bei einer PKW-Ladung am Hausnetz verursachen und zudem nur vier bis fünf mal wiederverwendet werden können.

Die einzige realistische Alternative bleibt also momentan der Druckbehälter, der auch in Testreihen bereits eingesetzt wurde.

Neben den reinen technischen Schwierigkeiten besteht ein weiterer Nachteil in den zum Teil recht niedrigen Wirkungsgraden. Die reine Brennstoffzelle verfügt über einen Wirkungsgrad von 40 bis 60 %, je nach Variante. Im Vergleich dazu soll dieser beispielsweise bei der Redox-Flow-Zelle bei etwa 80 % liegen.<sup>41</sup>

Auch die Herstellung und Übertragung von Wasserstoff verursacht Verluste. Die aufwendige Verflüssigung oder der Transport in Druckbehältern unter hohem Explosionsrisiko stellen Aufwendungen dar.

Ein weiteres Problem ist die Erzeugung, die momentan nicht sehr umweltschonend erfolgt. Neben der umweltfreundlichen Elektrolyse, die Wasserstoff mit Hilfe von elektrischem Strom, vorzugsweise aus regenerativen Quellen, erzeugt, wird vor allem noch sehr häufig die Herstellung per Dampfreformer, partieller Oxidation und anderen

---

41 Nach [ISEA10]

Verfahren, die als Ausgangsstoffe Kohlenwasserstoffe, wie Erdöl, Erdgas, Methanol oder Kohle, verwenden, angewendet. Diese Verfahren verursachen, wie die Erzeugung von Strom aus fossilen Brennstoffen, CO<sub>2</sub> und tragen nicht zu einer umweltfreundlichen Elektromobilität bei. Auch die Wirkungsgrade sind auf Grund hoher benötigter Temperaturen und Verlusten nicht optimal.

Einzig Ansätze, wie das Kvaerner Verfahren, das in einer Pilotanlage seit 1992 in Norwegen erprobt wird und bei sehr hohen Temperaturen Kohlenwasserstoffe in Wasserstoff und Aktivkohle umsetzt, arbeitet, wenn man die Aktivkohle als Nutzprodukt und den entstehenden Heißdampf, der ebenfalls weiterverwendet wird, mit berücksichtigt, mit einem Wirkungsgrad von annähernd 100 %.<sup>42</sup> Zudem ist eine interessante Entwicklung die Forschung mit Enzymen aus Algen, die biologisch das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen. Allerdings ist dies reine Forschung und von eventuellen Anwendungsmöglichkeiten noch weit entfernt.

Selbst wenn der Wirkungsgrad gesteigert werden kann und die Herstellung optimiert wird, ist es fragwürdig, ob die Versorgung mit Wasserstoff in der benötigten Größenordnung zur Verfügung gestellt werden kann.<sup>43</sup>

#### ***4.4 Trennung in Stadt- und Langstreckenfahrzeug***

Ein denkbare Szenario, das die Probleme von Langstreckenfahrten mit Elektroautos lösen könnte, ist die Trennung der PKW in Elektro-Stadtautos und Langstreckenfahrzeuge, die weiterhin mit einem Diesel-, Gas- oder Benzinmotor ausgerüstet sind, wenn auch durch effizienzsteigernde Hybridvarianten ergänzt.<sup>44</sup>

Dieses Szenario ist vor Allem in Haushalten denkbar, die auch jetzt schon über mehr, als einen PKW verfügen.

Auch das Konzept von Wechselkennzeichen kann dazu beitragen. Bei seiner Rede beim bayerischen Kraftfahrzeuggewerbe sprach Bundesverkehrsminister Ramsauer davon, dass die Einführung geprüft werde.<sup>45</sup>

Wechselkennzeichen können zur Anschaffung eines Stadt-Elektroautos beitragen, da die Besitzer dann nur für einen PKW Steuern und Versicherung zahlen müssen und ein

---

42 Nach [GEIT04]

43 Nach [DIEB10]

44 Nach [WALL05]

45 Nach [BMVB10]

Elektrofahrzeug, dass zusätzlich als Stadtfahrzeug angeschafft wird keine quasifixen Kosten mehr verursacht, sondern nur noch die Anschaffungskosten und die variablen Kosten im Sinne von Energieverbrauch und Verschleiß.

Eine andere Idee sind Mietwagen oder Carsharing-Konzepte, die den Anwendern die Nutzung von Elektroautos im Stadtverkehr ermöglicht, ohne dass diese die hohen Investitionskosten tragen müssen.

Ein solches Konzept bietet beispielsweise Drive-CarSharing in ausgewählten Städten an. Dazu gehören Bochum, Düsseldorf, Köln, Braunschweig, Nürnberg und München.

Die Firma stellt an ausgewählten Ladestationen PKW bereit, die gegen eine Nutzungsgebühr ausgeliehen werden können und danach wieder am Ausgangsort platziert werden müssen. Dabei arbeitet Drive-CarSharing eng mit der deutschen Bahn AG zusammen, beispielsweise ist die Buchungsdatenbank mit DB CarSharing zusammengelegt.<sup>46</sup>

Als sinnvoller Einsatz wird die Kombination der Bahn als Fernstreckenbeförderung und dem CarSharing als Stadtkonzept propagiert. Ein Szenario eines weiteren Ausbaus des öffentlichen Fernverkehrs und der Nutzung des elektromobilen Individualverkehrs für die letzten Kilometer am Zielort scheint sinnvoll und bis zu einem gewissen Marktanteil wahrscheinlich.

---

46 Nach [DRIV10a] und [DRIV10b]

## 5 **Resumé**

Kapitel 5 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse, einer Bewertung der Ergebnisse und einem Ausblick auf die zukünftige Entwicklung ab.

### 5.1 *Zusammenfassung*

Aus der Analyse aktueller PKW lassen sich 3 Szenarien ableiten, zum einen eine Reichweite von 600 km mit einer Ladezeit von 10 Minuten als Optimum, zum anderen eine Ladung für eine Reichweite von 300 km in 10 Minuten und eine Reichweite von 300 km in 20 Minuten Ladezeit. Daraus resultieren benötigte Ladeleistungen von 396 kW, 198 kW und 99 kW, was bei einer Spannung von 400 V, die aktuell im Niederspannungsnetz einsetzbar sind, Stromstärken von 990 A, 495 A und 247,5 A erfordert.

Mit der aktuellen Steckernorm MENNEKES sind dagegen maximal 63 A vorgesehen, was deutlich unter den Forderungen der drei Szenarien liegt.

Die Ladestationen von Coulomb Technologies erreichen mit knapp 60 kW bereits etwa 60 % von Szenario 3, sind aber von den anderen Szenarien ebenfalls weit entfernt.

Auch theoretisch ist die Umsetzung problematisch. Das Szenario 3 ist mit einem Kabelquerschnitt von 95 mm<sup>2</sup> nach DIN 57100 Teil 523/VDE erreichbar, wie auch Szenario 2 mit einem Querschnitt von 300 mm<sup>2</sup>, wenn auch die Handhabung schwierig ist. Szenario 1 ist nach der DIN Richtlinie gar nicht realisierbar.

Auch von Seite der Batterie existieren erhebliche Probleme. Die Li-Ion Batterie lässt sich in der klassischen Form nicht für so hohe Ladeleistungen einsetzen.

Szenario 2 und 3 lassen sich von Seite der Tankstelle lösen. Bei Szenario 2 müsste vor Allem die Handhabung und Sicherung technisch gelöst werden, z.B. durch einen „Dockinganschluss“. Die Batterie allerdings muss durch eine andere Technik ersetzt werden. Dafür existieren bereits Lösungen, wie der Lithium-Eisen-Phosphat-Akku, die inzwischen im Einsatz sind und getestet werden.

Szenario 1 ist zum heutigen Stand der Technik kaum realisierbar. Dazu sollten Alternativen in Betracht gezogen werden. Ein Ansatz ist das Konzept des Akkutauschs, das die Firma Better Place verfolgt. Dabei wird statt der Ladung des Akkus im Auto selbiger komplett getauscht und im Anschluss ortsfest geladen.

Ein anderes, besonders interessantes Konzept ist der Flüssigkeitswechsel, wie bei der Redox-Flow-Zelle. Die Flüssigkeit kann ähnlich dem Benzin heute transportiert und fast vollständig aufbereitet werden. Dieses Konzept umgeht die Ladung vollständig und realisiert dadurch sehr geringe Tankzeiten.

Die Brennstoffzelle ist ebenfalls eine realistische technische Alternative, wobei hier Probleme mit der Speicherung und dem Transport des Wasserstoffes entstehen und die Herstellung zum jetzigen Zeitpunkt nicht sehr umweltschonend ist.

Die Trennung von Stadt- und Langstreckenfahrzeugen ist ein alternatives Konzept. Die Idee beruht auf dem CarSharing und ist bereits teilweise umgesetzt. Damit kann ein gewisser Anteil der Mobilitätsnachfrage gedeckt werden.

## **5.2 Bewertung der Ergebnisse**

Das Vorgehen an Hand von Szenarien ist ein guter Weg, um verschiedene Rechnungen durchzuführen. Allerdings werden dabei nicht alle Bedürfnisse der Nutzer realistisch getroffen und es lässt nicht die Schlussfolgerung zu, dass die Umsetzung eines Szenarios der Elektromobilität einen gewissen Marktanteil verschafft. Über den Marktanteil bei bestimmten Reichweite-Ladezeiten-Kombinationen müsste eine eigene Untersuchung erfolgen, um daraus gesicherte Schlüsse zu ziehen.

Die Werte, die aus Szenario 2 und 3 resultieren sind realisierbar, Leistungen in dieser Größenordnung sind heute schon in anderen Bereichen erforderlich. Szenario 1 dagegen stellt ein erhebliches Problem dar und es ist fraglich, ob dieses Szenario in der Form überhaupt umsetzbar ist.

Ein Problem der Rechnungen liegt in der Vernachlässigung von Verlusten. Zur Vereinfachung wurden Leitungsverluste komplett ignoriert, in der Realität sind diese gerade bei Strömen in der ermittelten Höhe nicht unerheblich.



Die Annahme des Verbrauchs zukünftiger Elektro-Langstreckenfahrzeuge ist sehr niedrig gewählt. Dieser spiegelt den Verbrauch unter optimalen Bedingungen wider, es wurden aber keine Vollastfahrten mit hoher Geschwindigkeit oder besonders große und schwere PKW berücksichtigt. Hier muss im Interesse der Umsetzung der Elektromobilität die Automobilindustrie noch optimieren, ansonsten sind die berechneten Leistungen nicht ausreichend.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Endergebnisse durchaus interessant sind und klare Grenzen der Technik aufzeigen. Man sieht, dass die reine Ladung für Langstreckenfahrzeuge auf unserem heutigen Komfort- und Mobilitätsniveau nicht ausreichen wird und alternativen benötigt werden. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf die Flüssigkeitswechsel gelegt werden, die diese Technologie ein enormes Potential birgt. Auch die Brennstoffzelle wird wichtiger, wenn die Wasserstoffherstellung optimiert wird.

### **5.3 *Ausblick***

Das Elektroauto in Reinform wird sich in absehbarer Zeit nicht als Langstreckenfahrzeug durchsetzen. Die Szenarien haben gezeigt, dass der Einsatz als Stadtfahrzeug oder in CarSharing-Konzepten wahrscheinlich und realisierbar ist, große Distanzen aber weiterhin eines Verbrennungsmotors bedürfen. Dabei werden sicherlich der Range-Extender und die Hybridfahrzeuge eine wichtige Rolle spielen. Fernstreckenladeinfrastruktur wird außer in Pilotanlagen in den nächsten Jahren eine untergeordnete Rolle spielen.

Interessant wird die Entwicklung der Alternativen, vor Allem der Redox-Flow-Zelle. Ob sich diese Technik durchsetzen kann und wird, wird sicherlich zum großen Teil von der Reaktion der Automobilindustrie und der Politik auf diese Technologie abhängen.

## Literaturverzeichnis

- [365E09] 365 ENERGY GROUP: CT1500 AND CT2500 - CHARGEPOINT NETWORKED CHARGING STATIONS, Datasheet by Coulomb Technologies, Inc. 2009, Abruf am 11.04.2010
- [AUEL10] AUTOMOBIL-ELEKTRONIK: APD 1 Pol Fingerschutz-Stecker, <http://www.all-electronics.de/ael/product/49506-APD+1+Pol+Fingerschutz-Stecker?PHPSESSID=752ecebbba45f57716d06fc5ef7a51bd>, Abruf am 28.03.2010
- [AUMO09] Autor-Motor-und-Sport.de: Elektromobilität - Batterie-Wechselstationen für Elektroautos, <http://www.auto-motor-und-sport.de/eco/akku-austausch-elektroauto-1325568.html>, Abruf am 11.04.2010
- [AURE10] Automobilrevue.de: Öko-Ei - Wie BMW die "A-Klasse" entwickelte und sie als Konzept E1 wieder sterben lies, [http://www.automobilrevue.de/bmw\\_e1.htm](http://www.automobilrevue.de/bmw_e1.htm), Abruf am 27.03.2010
- [AUTO10] Autobild.de: Hitliste der meistverkauften Autos 2009 - Die Party ist vorbei, [http://www.autobild.de/artikel/hitliste-der-meistverkauften-autos-2009\\_1036259.html](http://www.autobild.de/artikel/hitliste-der-meistverkauften-autos-2009_1036259.html), Abruf am 27.03.2010
- [BERG09] Berger, R.: Powertrain 2020 - CHALLENGES AND OPPORTUNITIES OF ALTERNATIVE POWERTRAINS, Foliensatz aus der Übungseinheit "IntegrierteProduktionsplanung" am WBK, Karlsruhe 2009
- [BMVB10] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Ramsauer: Wechselkennzeichen für saubere Fahrzeuge prüfen, [http://www.bmvbs.de/Presse/Pressemitteilungen-,1632.1118943/Ramsauer-Wechselkennzeichen-fu.htm?global.back=/Presse/-%2C1632%2C6/Pressemitteilungen.htm%3Flink%3Dbmv\\_liste%26link.sKategorie%3D](http://www.bmvbs.de/Presse/Pressemitteilungen-,1632.1118943/Ramsauer-Wechselkennzeichen-fu.htm?global.back=/Presse/-%2C1632%2C6/Pressemitteilungen.htm%3Flink%3Dbmv_liste%26link.sKategorie%3D), Abruf am 15.04.2010

- [BRUN10] Brunke, J.-C.: Elektromobilität im Fokus – Infrastruktur, Seminararbeit am Institut für Industriebetriebslehre und industrielle Produktion, Energiesystemanalyse und Umwelt, Karlsruher Institut für Technologie 2010
- [BUCH05a] Buchmann, I.: Aufladen bei hohen und tiefen Temperaturen, <http://www.batteryuniversity.com/partone-14-german.htm>, Abruf am 05.04.2010
- [BUCH05b] Buchmann, I.: Tabelle über was tun und nicht tun mit Batterien, <http://www.batteryuniversity.com/partone-21-german.htm>, Abruf am 05.04.2010
- [BUND09] Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung, vom August 2009, Abruf am 09.04.2010
- [BÜTT06] Büttner, W. E.: Grundlagen der Elektrotechnik 1, Band 1, 2. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2006
- [CELL09] Cellstrom: TECHNOLOGIE DER VANADIUM REDOX FLOW BATTERIE, Cellstrom 2009, Abruf am 12.04.2010
- [COUL10a] Coulomb Technologies, Inc.: Level III Fast Charging Stations Announced, <http://www.coulombtech.com/blog/tag/level-3-fast-charging/>, Abruf am 01.04.2010
- [COUL10b] Coulomb Technologies, Inc.: Charging Stations, <http://www.coulombtech.com/products-charging-stations.php>, Abruf am 01.04.2010
- [DIEB10] dieBrennstoffzelle.de: Die Brennstoffzelle, <http://www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/index.shtml>, Abruf am 12.04.2010
- [DIEF09] Diefenbach, I.: Elektromobilität - Der mobile Kunde – Elektrofahrzeuge als neue Herausforderung für Netze, Vortrag, RWE WVE Netzservice GmbH, Hannover 2009, Abruf am 11.04.2010
- [DIN571] DIN 57100 Teil 523/VDE 0100 Teil 523.6-81: Kabelquerschnitte, Abruf am 09.04.2010
- [DRIV10a] DRIVE Electric Car: Drive-CarSharing: Der erste Schritt zur e-Mobilität, <http://www.drive-ecity.de/index.html>, Abruf am 15.04.2010

- [DRIV10b] Drive CarSharing: Homepage, <http://www.drive-carsharing.de/>, Abruf am 15.04.2010
- [EDIS99] EDISION, ELECTRIC TRANSPORTATION DIVISION: PERFORMANCE CHARACTERIZATION 1999 CHRYSLER EPIC WITH SAFT NICKEL/METAL-HYDRIDE BATTERY, November 1999, Abruf am 09.04.2010
- [ELAU10] ELEKTROAUTO-FAHREN.COM: Oliver Wyman Studie: Powerplay beim Elektroautos, <http://www.elektroauto-fahren.com/oliver-wyman.html>, Abruf am 15.04.2010
- [ELEK09a] elektrotechniknet.de: Elektromobilität: Redox-Flow-Batterien als Alternative zu Li-Ionen, [http://www.elektroniknet.de/power/news/article/23696/0/Elektromobilitaet\\_Redox-Flow-Batterien\\_als\\_Alternative\\_zu\\_Li-Ionen/](http://www.elektroniknet.de/power/news/article/23696/0/Elektromobilitaet_Redox-Flow-Batterien_als_Alternative_zu_Li-Ionen/), Abruf am 11.04.2010
- [ELEK09b] elektrotechniknet.de: Kondensator zieht mit Akku gleich, [http://www.elektroniknet.de/bauelemente/news/article/20944/0/Kondensator\\_zieht\\_mit\\_Akku\\_gleich/](http://www.elektroniknet.de/bauelemente/news/article/20944/0/Kondensator_zieht_mit_Akku_gleich/), Abruf am 12.04.2010
- [ELEK10] elektroauto-tipp.de: Elektro-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge, <http://www.elektroauto-tipp.de/modules.php?name=Autos>, Abruf am 20.01.2010
- [ELFA10] Elektrofahzeug.net: Daimler Benz A Klasse Electric, [http://www.elweb.info/data/dc\\_a\\_e/dc\\_a\\_e.htm](http://www.elweb.info/data/dc_a_e/dc_a_e.htm), Abruf am 27.03.2010
- [FAZN10] FAZ.NET: Smart mit Batterie - E wie elektrisch oder wie Ernst, Von Michael Kirchberger am 11.01.2010, <http://www.faz.net/s/Rub1DABC609A05048D997A5F315BF55A001/Doc~E413CC80238E64F0D8FD327148DAEA4E2~ATpl~Ecommon~Scontent.html>, Abruf am 20.01.2010
- [FOCU10] Focus Online: General Motors EV1 - Die ausgebremste Zukunft, Artikel von Sebastian Viehmann vom 18.01.2010, [http://www.focus.de/auto/gebrauchtwagen/tid-16795/general-motors-ev1-die-ausgebremste-zukunft\\_aid\\_469423.html](http://www.focus.de/auto/gebrauchtwagen/tid-16795/general-motors-ev1-die-ausgebremste-zukunft_aid_469423.html), Abruf am 20.01.2010

- [GEIT04] Geitmann, S.: Wasserstoff und Brennstoffzellen - Die Technik von morgen, Hydrogeit, 2004, S. 69
- [GIFA09] GIFAS-ELECTRIC: SORTIMENTSINFO 72, Rheineck 2009, Abruf am 11.04.2010
- [GREE05] Green Car Congress: Maya 100 EV to Sell in Norway, Mai 2005, [http://www.greencarcongress.com/2005/05/maya\\_100\\_ev\\_to\\_.html](http://www.greencarcongress.com/2005/05/maya_100_ev_to_.html), Abruf am 20.01.2010
- [GREE10] Green Car Congress: Tokyo Electric Power Licenses Aker Wade to Build Level III Fast Chargers, <http://www.greencarcongress.com/2010/01/akerwade-20100115.html>, Abruf am 03.04.2010
- [HYBR10] Hybrid-Autos.info: LUIS 4U green 2010, <http://www.hybrid-autos.info/elektro-fahrzeuge/luis/luis-4u-green-2010.html>, Abruf am 11.04.2010
- [ISEA10] Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe RWTH Aachen: Batterietechnologie und Speichersysteme – Redox-Flow-Batteriesysteme, <http://www.isea.rwth-aachen.de/eess/technology/redox-flow>, Abruf am 11.04.2010
- [KBA 10a] Kraftfahrtbundesamt: Jahresbilanz der Neuzulassungen 2009, [http://www.kba.de/cln\\_016/nn\\_125396/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/2009\\_\\_n\\_\\_jahresbilanz.html](http://www.kba.de/cln_016/nn_125396/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/2009__n__jahresbilanz.html), Abruf am 25.03.2010
- [KBA 10b] Kraftfahrtbundesamt: Emissionen, Kraftstoffe - Deutschland und seine Länder am 1. Januar 2010, [http://www.kba.de/cln\\_015/nn\\_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2010\\_\\_b\\_\\_emi\\_\\_eckdaten\\_\\_absolut.html](http://www.kba.de/cln_015/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2010__b__emi__eckdaten__absolut.html), Abruf am 15.04.2010
- [LISG06] Lindner, H.; Siebke, W.; Günter, S.: Physik für Ingenieure, 17. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig 2006, S. 575
- [LUIS10] LUIS4U: Informationen zu unseren Lithium Akkus, <http://4u.luis.de/elektroauto/wissenswertes>, Abruf am 11.04.2010

- [MENN09] MENNEKES: Elektroautos: Mennekes erhält ersten eCarTec Award 2009, [http://www.mennekes.de/web/screen?ID=mennekes%2Flive-browse-fresh%2F\[lrncontent%2C\[content%2Fpres.cnt.page-seqentry%2FmenP5ee6b022%3A124cf88e0b0%3A-3eb%2F0%2F%2Ccontent%2Fexp.def-live%2Fde%2F\]\]](http://www.mennekes.de/web/screen?ID=mennekes%2Flive-browse-fresh%2F[lrncontent%2C[content%2Fpres.cnt.page-seqentry%2FmenP5ee6b022%3A124cf88e0b0%3A-3eb%2F0%2F%2Ccontent%2Fexp.def-live%2Fde%2F]]), Abruf am 25.01.2010
- [NAUN07] Naunin, D.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, 4. Auflage, expert verlag, Renningen 2007
- [NYTI09] nytimes.com: The Green Issue - Batteries Not Included, [http://www.nytimes.com/2009/04/19/magazine/19car-t.html?\\_r=3&pagewanted=all](http://www.nytimes.com/2009/04/19/magazine/19car-t.html?_r=3&pagewanted=all), Abruf am 11.04.2010
- [OIEA10] OIE AG: Erdgas tanken, [http://www.gibgas.de/OIE\\_AG/tankvorgang.php](http://www.gibgas.de/OIE_AG/tankvorgang.php), Abruf am 27.03.2010
- [PARK09] PARK & CHARGE: Allgemeine Infos - Stromtankstellen für Elektromobile, <http://www.park-charge.de/infos%20Allgemein.htm>, Abruf am 28.01.2010
- [REIC03] Reichel, R.: Solarmobile und Energiefragen, [www.solarmobil.net/download/Mobile%20und%20Energie.pdf](http://www.solarmobil.net/download/Mobile%20und%20Energie.pdf), Abruf am 20.03.2010, S. 17
- [REIC04] Reichel, R.: Vortrag auf dem Klimakongress Hamburg 2004: „verkehr-macht-klima“ am 13.11.2004, Abruf am 20.01.2010
- [REIC05] Reichel, R.: Aktuelle Elektrofahrzeuge, aus Solarmobil Mitteilungen Nr. 59 – November 2005, Abruf am 20.01.2010
- [RITTAL] RITTAL: Rittal – eMobility Ladestationen der Zukunft, Abruf am 11.04.2010
- [ROGG10] Roggmann & Partner: Pressemitteilung vom 26.02.2010, <http://www.firmendb.de/pressemitteilungen/pressemitteilung-6853.php>, Abruf am 25.03.2010
- [RPON10] rp-online.de: Elektro-Sportler Lightning GT, [http://www.rp-online.de/auto/Elektro-Sportler-Lightning-GT\\_bid\\_26192.html](http://www.rp-online.de/auto/Elektro-Sportler-Lightning-GT_bid_26192.html), Abruf am 28.03.2010

- [SCHW06] Schwab, A. J.: Elektro-energiesysteme – Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie, 2. aktualisierte Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2006
- [SPAT10] Spath, D.: Wie Deutschland zum Leitanbieter für marktfähige Elektromobilität werden kann, aus Vortrag acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN vom 21.01.2010, Abruf am 08.04.2010
- [SPIE10] Spiegel Online: Technischer Durchbruch - Elektroautos bekommen Einheitsstecker, Vom 19.04.2009, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,619833,00.html>, Abruf am 20.10.2010
- [TESL10] Tesla Motors: Homepage, <http://www.teslamotors.com>, Abruf am 01.04.2010
- [UNIM10] Uni Marburg: Brennstoffzelle.jpg, <http://www.uni-marburg.de/fb15/ag-roling/forschung/Brennstoffzelle.jpg>, Abruf am 18.04.2010
- [TIMM09] Timmer, J.: Lithium breakthrough could charge batteries in 10 seconds, <http://arstechnica.com/science/news/2009/03/lithium-breakthrough-could-charge-batteries-in-10-seconds.ars>, Abruf am 05.04.2010
- [WALL05] Wallentowitz, H.: Zukünftige Antriebstechniken: Welche Energien können uns antreiben?, Fachkongress „Kraftstoffe der Zukunft“, Essen 2005, Abruf am 25.03.2010
- [WATT10] wattgehtab.com: Elektroauto-Ladestecker von Mennekes soll Standard werden, Von Markus Pfliegerl am 18.05.2009, <http://www.wattgehtab.com/stromlade-infrastruktur/elektroauto-ladestecker-von-mennekes-soll-standard-werden-2372>, Abruf am 22.01.2010

## Stichwortverzeichnis

Akkutausch	S. 46 ff.
Brennstoffzelle	S. 50 ff.
Hybrid	S. 13 ff.
Kapazität	S. 11
Ladeleistung	S. 10
Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator	S. 43
Lithium-Ionen Superpolymer Akku	S. 29
LUIS 4U	S. 43 f.
Maya 100	S. 17 f., 28
MENNEKES	S. 19 f., 33 ff.
Mittelspannungsnetz	S. 11
Niederspannungsnetz	S. 11
Park & Charge	S. 20 ff.
Redox-Flow-Zelle	S. 48 ff.
Szenario 1	S. 27, 29 f.
Szenario 2	S. 27, 30 f.
Szenario 3	S. 27, 31 f.
Schutzart IP 65	S. 32, 34 f.
Wechselkennzeichen	S. 53 f.